



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**DETERMINACIÓN DE FUERZAS AERODINÁMICAS EN UNA
ESFERA Y MEDIA ESFERA**



Memoria y Anexos

Autor/a: Raúl Troyano Sánchez
Director/a: Alfred Fontanals García
Convocatoria: Enero 2021

Resumen

El presente trabajo de fin de grado, tiene como objetivo el estudio de las fuerzas aerodinámicas que se generan sobre una esfera lisa y una media esfera provocadas por un flujo externo de aire.

Para ello, se realiza en primera instancia un análisis experimental en el laboratorio del departamento de Mecánica de Fluidos, donde haciendo uso de un túnel de viento, se obtienen fuerzas aerodinámicas y perfiles de velocidad a diferentes velocidades de flujo.

En segundo lugar, se han realizado simulaciones numéricas con CFD (*Computational Fluid Dynamics*) de los experimentos realizados en el laboratorio con el fin de comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los de las simulaciones. En este apartado del trabajo se detalla el procedimiento de varias simulaciones para un mismo experimento, hasta seleccionar la configuración y modelo de turbulencia idóneos a nuestro caso en particular y poder conseguir unos resultados óptimos para su comparación a posteriori.

Finalmente se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones, obteniendo mapas de velocidad y presión, perfiles de velocidad, coeficientes de arrastre y sustentación, entre otros.

Resum

Aquest treball de final de grau té com a objectiu estudiar les forces aerodinàmiques generades en una esfera llisa i mitja causada per un flux d'aire extern.

Per a això, es realitza un anàlisi experimental al laboratori del departament de Mecànica de Fluids, on utilitzant un túnel de vent, s'obtenen forces aerodinàmiques i perfils de velocitat a diferents velocitats de flux.

En segon lloc, s'han realitzat simulacions numèriques amb CFD (*Computational Fluid Dynamics*) d'experiments realitzats al laboratori per comparar els resultats obtinguts experimentalment amb els de les simulacions. Aquesta secció del treball detalla el procediment de diverses simulacions per a un mateix experiment, fins a seleccionar el model de configuració i turbulència adequat per al nostre cas particular i poder aconseguir resultats òptims per a la comparació posterior.

Finalment, s'analitzaran els resultats obtinguts a partir de les simulacions, obtenint mapes de velocitat i pressió, perfils de velocitat, coeficients de resistència i sustentació, entre d'altres.

Abstract

This end-of-degree work aims to study the aerodynamic forces generated on a smooth sphere and a half sphere caused by an external airflow.

To do this, an experimental analysis is performed in the laboratory of the Fluid Mechanics department, where using a wind tunnel, we can obtain aerodynamic forces and speed profiles at different flow speeds.

Secondly, numerical simulations have been performed with CFDs (Computational Fluid Dynamics) of experiments carried out in the laboratory in order to compare the results obtained experimentally with those of the simulations. This section work details the procedure of several simulations for the same experiment, until selecting the configuration and turbulence model suitable for our particular case and being able to achieve optimal results for a later comparison.

Finally, the results obtained from the simulations will be analyzed, obtaining speed and pressure maps, speed profiles, drag and lift coefficients, and others.



Agradecimientos

Con este trabajo, culmina una etapa muy bonita a la vez que dura por momentos, tras la cual debo agradecerle a mi familia y amigos todo el apoyo y confianza que han depositado en mí durante estos años. También quiero dar las gracias a los grandes docentes que me han acompañado en este proceso, en especial a mi tutor Alfred Fontanals por haberme guiado y ayudado en la realización de este proyecto.





Glosario

Magnitud	Símbolo	Unidad
Área	A	m ²
Diámetro	D	m
Velocidad	c	m/s
Masa	m	kg
Volumen	V	m ³
Tiempo	t	s
Caudal volumétrico	\dot{V}	m ³ /s
Caudal másico	\dot{m}	Kg/s
Presión	p	Pa
Densidad	ρ	Kg/m ³
Viscosidad cinemática	ν	m ² /s
Viscosidad dinámica	μ	Pa · s
Número de Reynolds	Re	Adimensional
Número de Mach	Ma	Adimensional
Fuerza de arrastre	F _R	N
Coefficiente de arrastre	C _D	Adimensional
Fuerza de sustentación	F _L	N
Coefficiente de sustentación	C _L	Adimensional
Velocidad del sonido	a	m/s



Índice

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
GLOSARIO	VII
1. INTRODUCCIÓN	11
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	13
2.1 Conservación de masa. Ecuación de la continuidad.	13
2.2 Tipos de flujo. Flujo laminar y turbulento.	16
2.3 La Capa límite	17
2.4 El Principio de Bernoulli	18
2.5 Fuerzas aerodinámicas	20
2.5.1 La fuerza de sustentación	21
2.5.2 La fuerza de arrastre	25
2.6 Separación de la capa límite	27
2.6.1 Flujo sobre cilindros y esferas	27
2.6.2 Flujo paralelo sobre placa plana	30
2.7 Vorticidad y rotacionalidad	32
3. FASE EXPERIMENTAL	33
3.1 Túnel de viento	33
3.1.1 Túnel de viento utilizado	33
3.1.2 Funcionamiento	35
3.2 Procedimiento	38
3.3 Resultados	41
3.3.1 Determinación del coeficiente de arrastre	41
3.3.2 Perfil de velocidades	46
4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	51
4.3 Esfera lisa	52
4.3.1 Modelado	52
4.3.2 Mallado	54

4.3.3	Ajuste de parámetros y configuraciones de malla	56
4.3.4	Resultados	63
4.4	Media esfera	74
4.4.1	Modelado	74
4.4.2	Mallado	75
4.4.3	Ajuste de parámetros y configuraciones de malla	76
4.4.4	Resultados	84
CONCLUSIONES	_____	93
PRESUPUESTO	_____	95
BIBLIOGRAFÍA	_____	97
ANEXO A	_____	98

1. Introducción

Alguna vez hemos oído hablar del término de “aerodinámica”, ya sea en el mundo de la automoción, en la Fórmula 1 o cualquier competición de motor, o en la aviación. Pues es que la aerodinámica ha tenido un papel fundamental en el desarrollo y evolución de vehículos y aeronaves desde sus primeros estudios. El hecho de entender que la incidencia del aire sobre cualquier objeto tiene efectos significativos sobre él, ha cambiado nuestro mundo, ya que sin esta idea no existirían los aviones o nuestros coches no serían como son ahora.

En los últimos años, los conocimientos sobre aerodinámica han avanzado muchísimo, gracias a las simulaciones aerodinámicas con CFD y la combinación de éste con un túnel de viento. El CFD es una herramienta informática utilizada para entender y predecir el comportamiento de un fluido en unas condiciones determinadas. De esta manera podemos saber, por ejemplo, que cuerpos generan menos resistencia al aire, obteniendo diseños de vehículos mucho más eficientes y reduciendo así sus emisiones y consumo de combustible.

Basándonos en ésta última idea, se van a analizar dos figuras en un túnel de viento, una esfera lisa y una media esfera (también lisa), y posteriormente se harán simulaciones aerodinámicas con CFD con el objetivo de poder comparar los resultados y conocer al detalle que fenómenos y fuerzas ocurren en éstos cuando un flujo de aire los atraviesa.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de uso común en el análisis del flujo de fluidos necesarios para hacer una buena interpretación de los resultados obtenidos en la fase experimental de este proyecto.

2.1 Conservación de masa. Ecuación de la continuidad.

La expresión general para la conservación de masa que se aplica a un volumen de control es la siguiente:

$$0 = \int_{VC} \frac{\delta \rho}{\delta t} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Cuando existen entradas y salidas definidas adecuadamente, la ecuación (2.1) puede reescribirse como:

$$\int_{VC} \frac{\delta \rho}{\delta t} dV = \sum_{ent} \dot{m} - \sum_{sal} \dot{m} \quad (\text{Ec.2.2})$$

En palabras, la variación neta de masa dentro del volumen de control es igual a la masa que fluye hacia el volumen de control menos la masa que fluye afuera del volumen de control. Para generar una ecuación diferencial para la conservación de masa, hay que imaginar que el volumen de control se encoge a tamaño infinitesimal, con dimensiones dx , dy y dz .

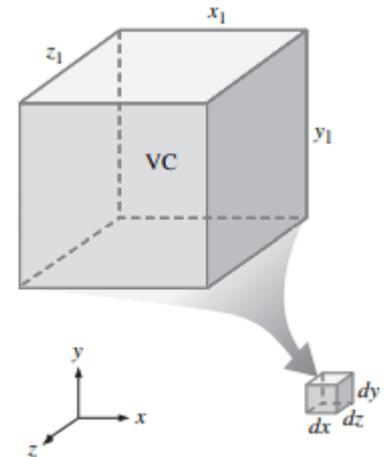


Figura 2.1. Volumen de control infinitesimal. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

Para un VC infinitesimal y fijo:

$$\int_{VC} \frac{\delta \rho}{\delta t} dV \approx \frac{\delta \rho}{\delta t} dx dy dz \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Aplicando las variaciones de flujo a las caras del VC i la ecuación (2.2) a la (2.1), la ecuación infinitesimal queda:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x}(\rho u) + \frac{\delta}{\delta y}(\rho v) + \frac{\delta}{\delta z}(\rho w) = 0 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{c}) = 0 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

- **Flujo compresible estacionario.**

Si el flujo es compresible pero estacionario, $\delta/\delta t$ de cualquier variable es igual a cero. Por lo tanto, de la ecuación 2.5 se deduce:

$$\vec{\nabla}(\rho \vec{c}) = 0 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

En coordenadas cartesianas:

$$\frac{\delta}{\delta x}(\rho u) + \frac{\delta}{\delta y}(\rho v) + \frac{\delta}{\delta z}(\rho w) = 0 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

En coordenadas cilíndricas:

$$\frac{1}{r} \frac{\delta(r \rho u_r)}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta(\rho u_\theta)}{\delta \theta} + \frac{\delta(\rho u_z)}{\delta z} = 0 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

- **Flujo incompresible.**

Si el flujo es incompresible, entonces de la expresión 2.5 obtenemos en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

En coordenadas cilíndricas:

$$\frac{1}{r} \frac{\delta(ru_r)}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta(u)}{\delta \theta} + \frac{\delta(u_z)}{\delta z} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Se considera que un fluido es incompresible cuando su densidad se mantiene constante en el tiempo.

Podemos considerar que un flujo es incompresible si:

$$Ma = \frac{c}{a} \leq 0.3 \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde,

Ma: número de Mach.

c: velocidad del fluido [m/s].

a: velocidad del sonido en el fluido [m/s].

Para el aire en condiciones estándar un flujo se puede considerar incompresible si la velocidad es menor de 100 m/s.

2.2 Tipos de flujo. Flujo laminar y turbulento.

Antes de explicar las diferencias entre un flujo laminar y un flujo turbulento es necesario introducir el término del número de Reynolds. El número de Reynolds es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido.

La expresión general del número de Reynolds es:

$$Re = \frac{cL_c}{\nu} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:

C: velocidad característica del fluido [m/s]

L_c: Longitud característica [m]

ρ: densidad del fluido [Kg/m³]

ν: viscosidad cinemática del fluido [m²/s]

μ: viscosidad dinámica del fluido [Pa·s]

- **Flujo laminar:** se caracteriza por realizar movimientos y trayectorias suaves y ordenadas de partículas del fluido. El fluido fluye en capas paralelas, es decir con una mezcla lateral mínima.
- **Flujo turbulento:** es el tipo de flujo más común que, al contrario que el laminar, es mucho más caótico, en el que las partículas se mueven de forma desordenada llegando a formar incluso vórtices.

Dependiendo de qué valor de Reynolds obtengamos, estaremos ante un flujo laminar o turbulento.

La transición en flujo externo ocurre normalmente para valores de número de Reynolds entre $5 \cdot 10^5$ y $1 \cdot 10^6$ y se producirá antes o después dependiendo en gran medida de la rugosidad de la superficie (como veremos más adelante), de la turbulencia de la corriente libre de aire y de la distribución de presiones.

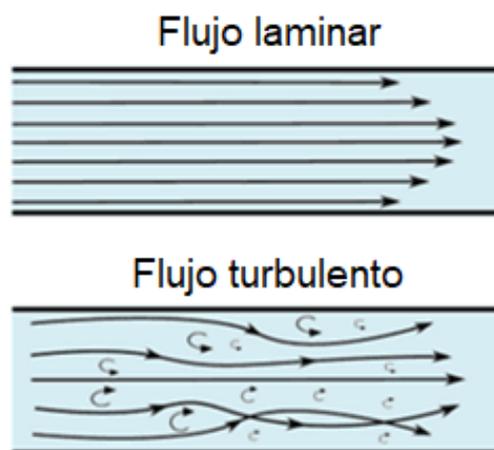


Figura 2.2. Flujo laminar y turbulento.
[Fuente: www.themal-engineering.com]

2.3 La Capa límite

Cuando un fluido entra en contacto con un sólido, su movimiento se ve perturbado debido a su viscosidad. Las moléculas de éste fluido se ven ralentizadas según se van acercando a la superficie del sólido hasta llegar a tener una velocidad nula (Figura 2.3). Por ejemplo, las gotas de agua que caen en el parabrisas de los coches, no salen expulsadas (aunque el vehículo esté en movimiento), sino que permanecen pegadas debido a su viscosidad.

Entonces, definimos la capa límite como la región en la cual la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada. Es en esta zona donde los efectos debido a la viscosidad son significativos.

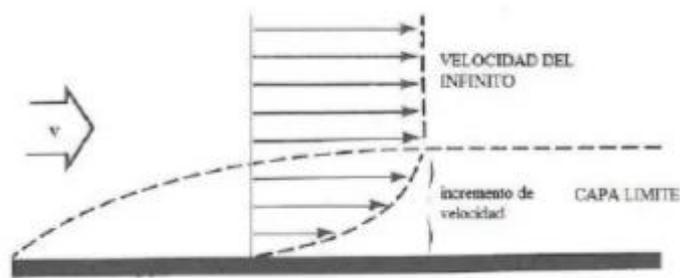


Figura 2.3 Capa límite. [Fuente:www.academia.edu]

2.4 El Principio de Bernoulli

El Principio de Daniel Bernoulli es un concepto básico en la aerodinámica. Bernoulli descubrió que la velocidad de un fluido es inversamente proporcional a la presión que ejerce. Esto quiere decir que cuando un fluido aumenta su velocidad, su presión disminuye y viceversa.

El Principio de Bernoulli expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido.

En la Figura 2.4 se muestra un fluido a través de un tubo Venturi, el cual se estrecha a mitad de camino. Podemos apreciar que $P_2 < P_1$.

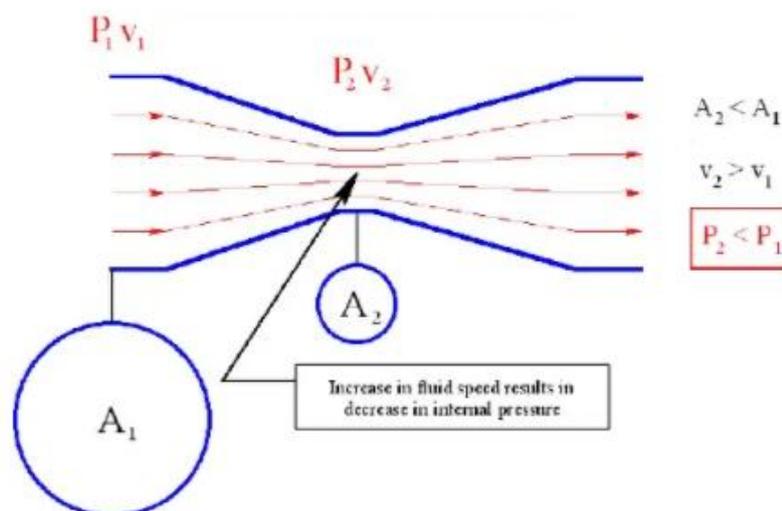


Figura 2.4. Tubo Venturi. [Fuente:www.academia.edu]

Dadas las siguientes expresiones:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

$$\dot{V} = cA \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde,

\dot{m} = Caudal másico [kg/s]

\dot{V} = Caudal volumétrico [m³/s]

C= velocidad del fluido [m/s]

A= área [m²]

Considerando un flujo incompresible y por lo tanto con densidad constante, y cumpliéndose la conservación de masa obtenemos que:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{Ec. 2.16})$$

$$\rho \dot{V}_1 = \rho \dot{V}_2 \quad (\text{Ec. 2.17})$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \quad (\text{Ec. 2.18})$$

$$c_2 = \frac{\dot{V}_1}{A_2} \quad \text{Ec. 2.19)$$

Consecuentemente, como el caudal volumétrico se mantiene constante, concluimos que la velocidad es inversamente proporcional al área de paso, es decir, que cuando la sección se estrecha la velocidad del fluido aumenta. Así que por el Principio de Bernoulli y de conservación de la energía, si la velocidad aumenta, la presión ha de disminuir.

Es importante recalcar que en la capa límite, debido a las fuerzas viscosas que se producen, el Principio de Bernoulli no se cumple.

2.5 Fuerzas aerodinámicas

Para entender mejor este apartado vamos a analizar un avión en pleno vuelo (Figura 2.5). Sobre este avión se ejercen 4 fuerzas principalmente:

- Fuerza de empuje o en inglés “thrust”, provocado por los motores a reacción de la aeronave.
- Peso o “weight”.
- Fuerza de resistencia o “drag”
- Fuerza de sustentación o “lift”.

Las dos últimas fuerzas son las ocasionadas por el fluido y dependen de la densidad de éste, de su velocidad, de la geometría, forma del cuerpo, entre otros.



Figura 2.5. Las 4 fuerzas que actúan sobre un avión en vuelo. [Fuente:gcs.co.uk]

2.5.1 La fuerza de sustentación

La fuerza de sustentación es la fuerza ocasionada por el fluido (en nuestro caso el aire), perpendicular a la dirección del movimiento del cuerpo.

Para entender cómo aparece esta fuerza, vamos a analizar el perfil alar. Un perfil alar produce una fuerza de elevación cuando se mueve en relación con el aire. Esta fuerza de elevación hace que un avión vuele. Recordando el Principio de Bernoulli, sabemos que un aumento de velocidad del aire conllevará a una disminución de presión. Por lo tanto, si conseguimos hacer pasar el aire más rápido por encima de las alas que por debajo, generaríamos una diferencia de presión y consecuentemente una fuerza en sentido ascendente.

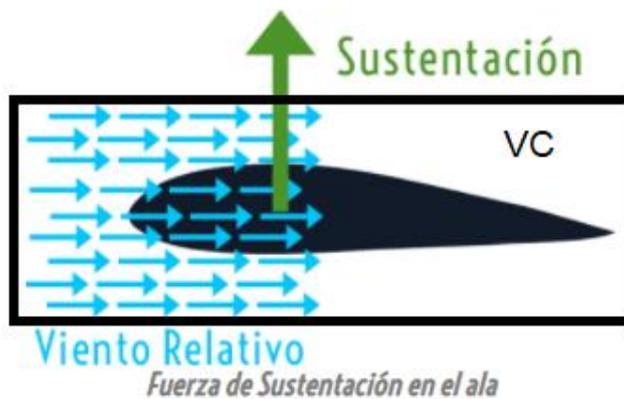


Figura 2.6. Fuerza de sustentación en un perfil alar.
[Fuente:gcs-limited.co.uk]

Vamos a establecer un volumen de control alrededor del perfil alar de la Figura 2.6. Debido a su forma y dándole una cierta inclinación positiva con respecto a la horizontal (ángulo de ataque), una parte de las moléculas de aire recorren la parte superior del ala y el resto pasan por debajo.

Haciendo referencia al principio de continuidad, el caudal de aire que entra ha de ser el mismo que sale del volumen de control. Así que, como las moléculas que van por encima han de recorrer más distancia, irán a una mayor velocidad que las de debajo, generando una corriente descendente y la fuerza de sustentación que ya hemos comentado.

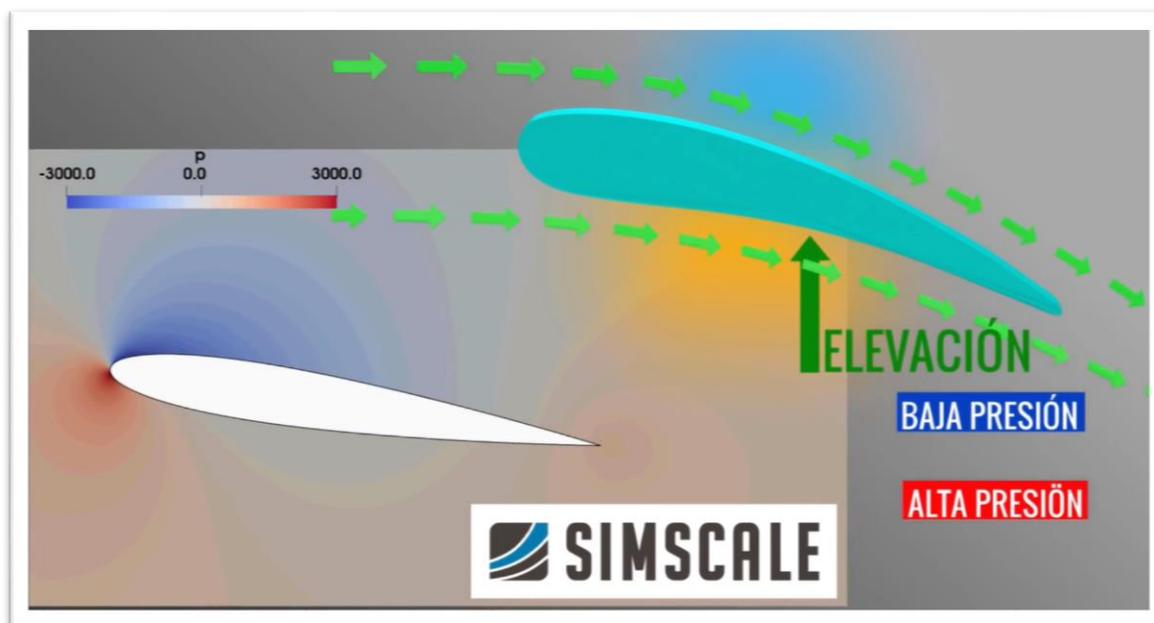


Figura 2.7. Análisis CFD del perfil alar.
[Fuente: Youtube/AprendelIngenieria: "Cómo vuelan los aviones"]

En la Figura 2.7 se muestra un análisis CFD usando el software de SIMSCALE donde enseña claramente este hecho.

Las alas del avión deflecan aire hacia abajo. Para deflecar aire hacia abajo el ala ha de tener cierto ángulo con la trayectoria del avión y es lo que se conoce como ángulo de ataque. Como vemos en la Figura 2.8, el ángulo de ataque es aquel que hay entre el viento relativo y la cuerda del perfil alar.

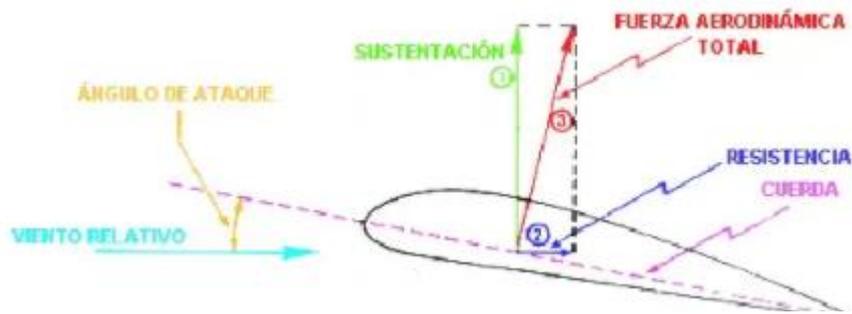


Figura 2.8. Fuerzas actuantes sobre un plano aerodinámico. [Fuente: www.academia.edu]

Cuanto mayor es el ángulo de ataque, mayor es la sustentación. Pero esto sucede hasta cierto punto. Existe un ángulo máximo para el cual el ala entra en pérdida.

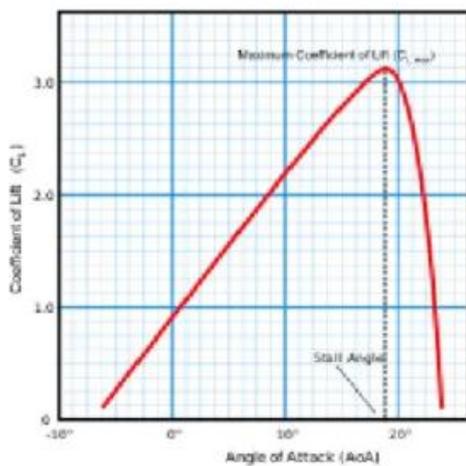


Figura 2.9. Coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque. [Fuente: www.academia.edu]

En la Figura 2.9 se puede apreciar este efecto. La sustentación aumenta con el ángulo de ataque hasta alcanzar un máximo y posteriormente entra en pérdida.

Si nos fijamos en la Figura 2.10 las líneas de flujo se han separado tanto por la posición del ala que al final se han desprendido. Este concepto en aerodinámica se conoce como desprendimiento de la capa límite.

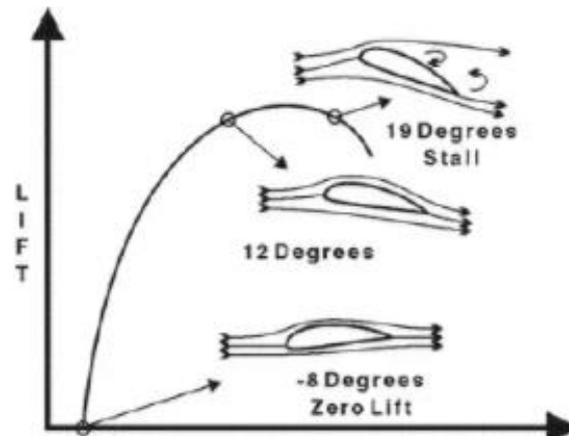


Figura 2.10. Arrastre y sustentación en función del ángulo de ataque. [Fuente:www.academia.edu]

En la práctica se utilizan coeficientes adimensionales para representar la efectividad de la forma de un cuerpo para producir sustentación.

Por ello, para cuantificar la fuerza de sustentación se utiliza un coeficiente de sustentación (C_L) que se calcula a partir de la expresión 2.20:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho c^2 A} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde,

F_L : Fuerza de sustentación [N]

ρ : densidad [kg/m^3]

c : velocidad [m/s]

A : área [m^2]

Por último, es importante comentar que, si un cuerpo es simétrico en la dirección del movimiento del fluido y el ángulo de ataque es cero, el coeficiente de sustentación es nulo, puesto que las fuerzas de sustentación que se generan son de igual magnitud y de sentido opuesto.

2.5.2 La fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre es la fuerza neta ejercida por un fluido sobre un cuerpo en la dirección de flujo debida a los efectos combinados de fuerzas de fricción y fuerzas de presión.

$$C_D = C_{Dfricción} + C_{Dpresión} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Al igual que con la fuerza de sustentación, para cuantificar la fuerza de arrastre se utiliza un coeficiente de arrastre (C_D), que se calcula mediante la expresión 2.22:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho c^2 A} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde,

F_D : Fuerza de arrastre [N]

ρ : densidad [kg/m^3]

c : velocidad [m/s]

A : área [m^2]

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

Figura 2.11. Coeficiente de arrastre dependiendo de la forma. [Fuente: Wikipedia]

La geometría del cuerpo juega un papel importante en los coeficientes.

En la Figura 2.11 podemos visualizar diferentes coeficientes de arrastre en función de la forma de diferentes sólidos (para un Reynolds de 10^4). Cuanto menor sea el C_D menos resistencia ofrecerá el sólido al paso del fluido.

El coeficiente de arrastre no es constante, depende de la velocidad, densidad y viscosidad del fluido, el tamaño y forma del objeto, la dirección del flujo y como veremos a continuación, de la rugosidad superficial. La velocidad, la viscosidad cinemática y una escala de longitud característica del objeto se incorporan en el número de Reynolds. Por lo tanto, C_D es también función de Re .

2.6 Separación de la capa límite

2.6.1 Flujo sobre cilindros y esferas

Como comentábamos en el apartado anterior, la fuerza de arrastre es resultante de los efectos combinados de fuerzas de fricción y de presión. Las fuerzas de fricción aumentan cuando aumenta el área superficial y las fuerzas de presión disminuyen cuando se consigue demorar la separación de la capa límite. Vamos a explicar esto último.

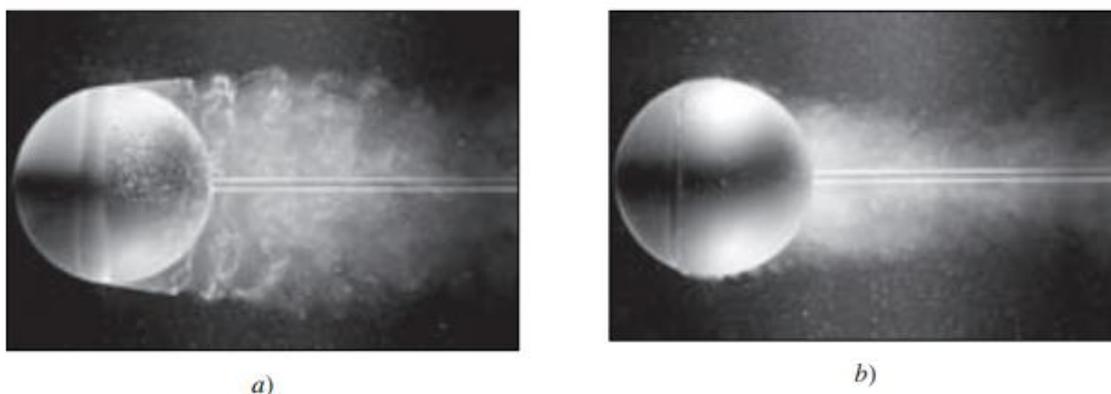


Figura 2.12. Flujo laminar y turbulento a través de una esfera lisa. [Fuente: *Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición*]

En la Figura 2.12 visualizamos un flujo a través de una esfera lisa. En la imagen a) el flujo se encuentra en régimen laminar, mientras que b) en régimen turbulento. Se puede apreciar como el fluido en b) permanece pegado a la esfera durante más tiempo que en a), es decir, que la capa límite tarda más en desprenderse. Este hecho disminuye considerablemente las fuerzas de presión.

Además, la presión y la velocidad en la zona de separación del flujo disminuyen y crean turbulencias y vórtices.

Por lo tanto, vemos que el estado del flujo, laminar o turbulento, tiene consecuencias en las fuerzas de presión que se generan.

Pero existe un factor clave que puede facilitar que nuestro flujo cambie de régimen laminar a turbulento. Estamos hablando de la rugosidad superficial.

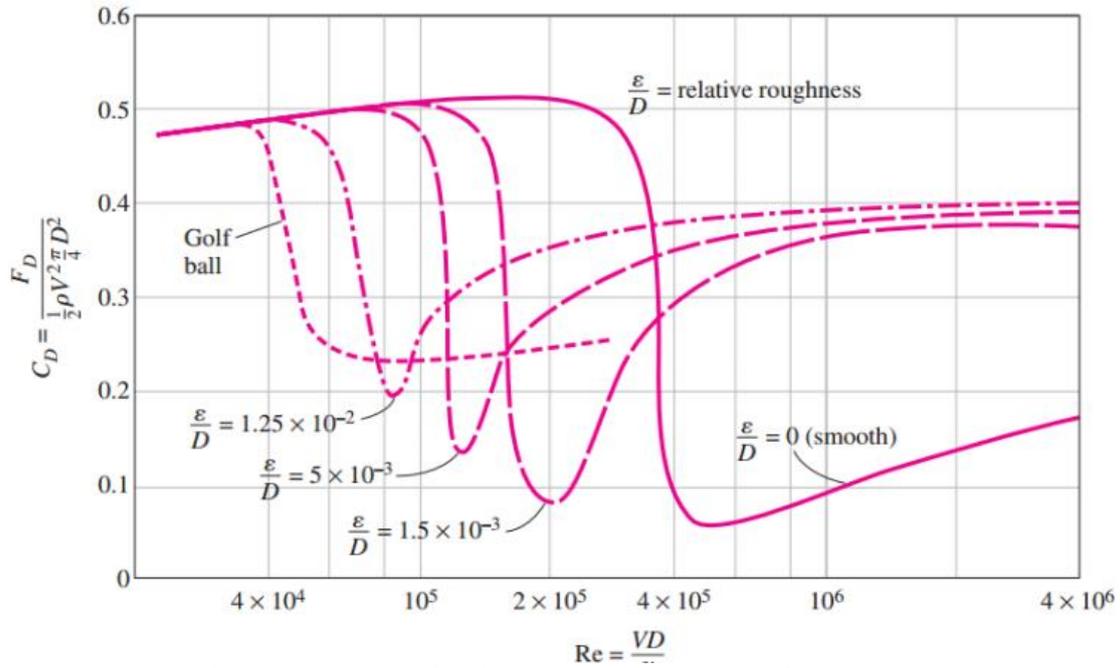


Figura 2.13. Coeficiente de arrastre en función del Reynolds y la rugosidad. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

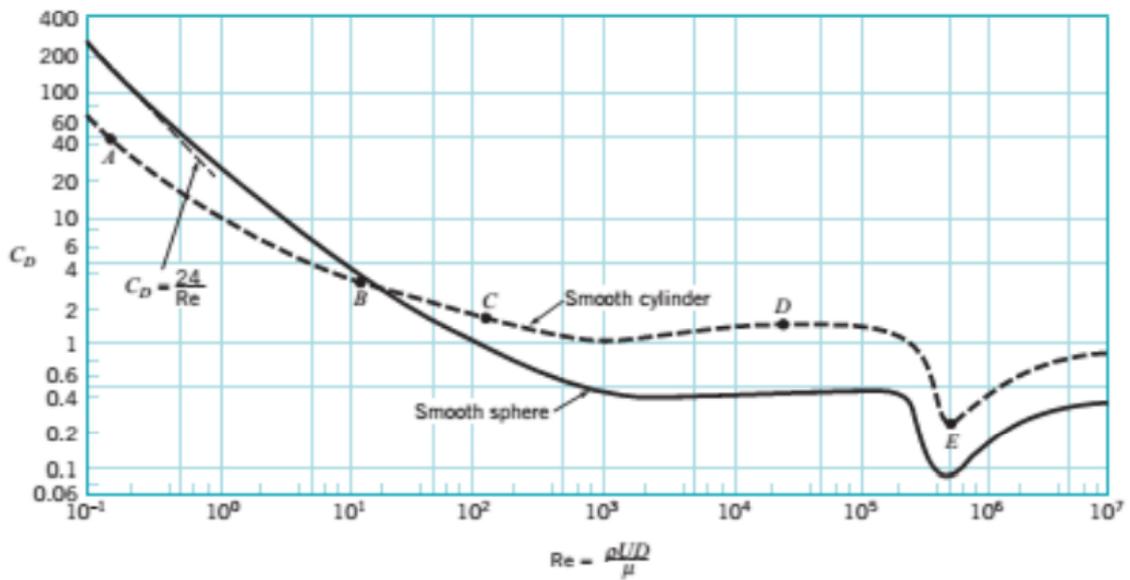
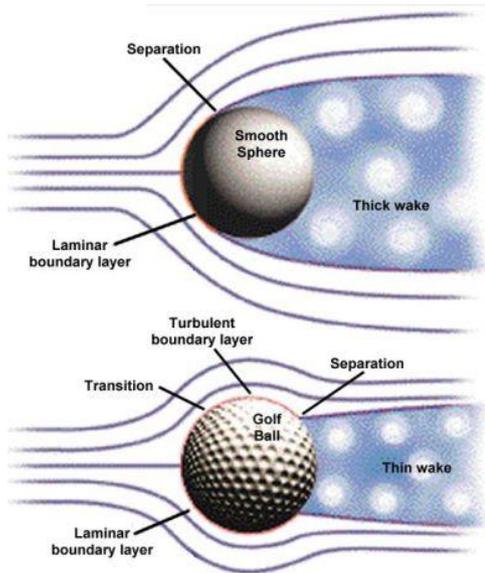


Figura 2.14. Coeficiente de arrastre en función del Reynolds y la rugosidad. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]



Podemos ver en las Figuras 2.13 y 2.14 que cuanto mayor es la rugosidad superficial de la esfera, la transición de régimen laminar a turbulento se produce con un Reynolds cada vez menor.

La Figura 2.15 muestra el efecto de la rugosidad superficial de una esfera, sobre el comportamiento de la capa límite.

Figura 2.15. Comparación del flujo a través de una esfera lisa y una pelota de golf. [Fuente: www.wordpress.com]

Por último es importante introducir el concepto de “estela”. La estela es la región de flujo atrás del cuerpo donde se sienten los efectos del cuerpo sobre la velocidad. Podemos observar en la Figura 2.17 el comportamiento de la estela formada en una esfera lisa en función del Reynolds.



Figura 2.16. Región de estela.

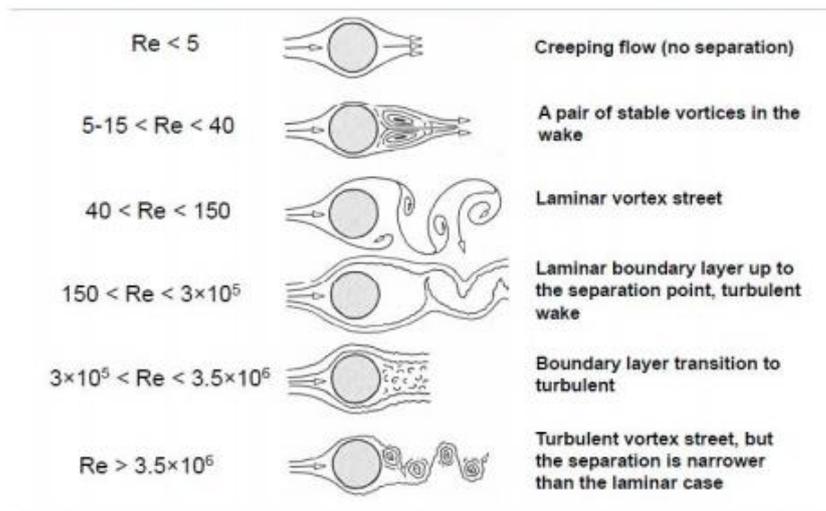


Figura 2.17. Comportamiento de la estela según el Reynolds. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

2.6.2 Flujo paralelo sobre placa plana

Para un flujo paralelo sobre una placa plana, las fuerzas de arrastre debido a la presión son nulas. Por lo tanto, el coeficiente de arrastre es igual al coeficiente de arrastre debido a fricción.

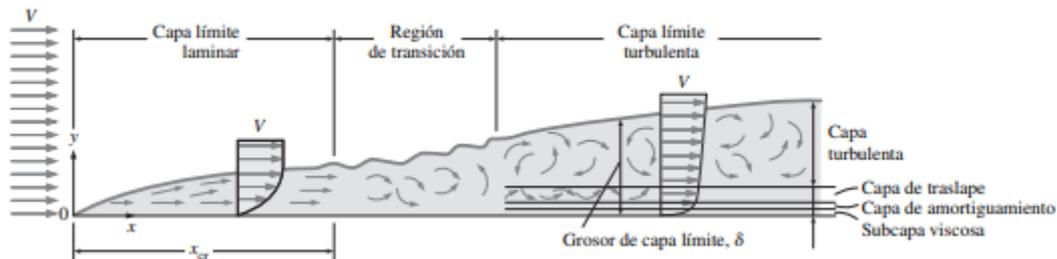


Figura 2.18. Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

La transición de laminar a turbulento se representa mediante el número de Reynolds. El número de Reynolds a una distancia x del borde de entrada de una placa plana de expresa como:

$$Re_x = \frac{\rho C x}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Donde,

C = velocidad corriente arriba [m/s]

X = longitud de la placa en la dirección del flujo. [m]

La transición de flujo laminar a turbulento comienza casi en $Re = 1 \cdot 10^5$ pero no se vuelve completamente turbulento antes de que el Reynolds alcance valores de alrededor de $3 \cdot 10^6$.

El grosor de la capa límite y el coeficiente de fricción en la posición x para flujo laminar

$$Re_x < 5 \cdot 10^5:$$

$$\delta = \frac{4,91x}{Re_x^{1/2}} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$C_{f,x} = \frac{0,644}{Re_x^{1/2}} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Para flujo turbulento:

$$5 \cdot 10^5 \leq Re_x \leq 10^7$$

$$\delta = \frac{0,38x}{Re_x^{1/5}} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$$C_{f,x} = \frac{0,059}{Re_x^{1/5}} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

El coeficiente de fricción promedio sobre toda la placa se obtiene de las siguientes expresiones:

Laminar:
$$C_{f,x} = \frac{1,33}{Re_L^{1/2}} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Turbulento:
$$C_{f,x} = \frac{0,074}{Re_L^{1/5}} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

La ecuación 2.28 proporciona el coeficiente de fricción promedio para toda la placa cuando el flujo es laminar en toda la placa. En cambio, la ecuación 2.29 proporciona el coeficiente de fricción cuando el flujo es turbulento en toda la placa.

2.7 Vorticidad y rotacionalidad

El vector de vorticidad se define matemáticamente como el rotacional del vector velocidad. Por lo tanto, la vorticidad es una medida de la rotación de una partícula de fluido.

Vector de vorticidad en coordenadas cartesianas:

$$\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z) = \left(\frac{\delta w}{\delta y} - \frac{\delta v}{\delta z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\delta u}{\delta z} - \frac{\delta w}{\delta x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\delta v}{\delta x} - \frac{\delta u}{\delta y} \right) \vec{k} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

En coordenadas cilíndricas:

$$\vec{\omega} = \left(\frac{\delta v}{\delta x} - \frac{\delta u}{\delta y} \right) \vec{k} = \frac{1}{r} \left(\frac{\delta(ru_\theta)}{\delta r} - \frac{\delta_{u_r}}{\delta \theta} \right) \vec{k} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

Si la vorticidad no es nula significa que el campo es rotacional y por lo tanto una partícula que se encuentre en ese campo estará girando. De manera contraria, si la vorticidad es nula o despreciablemente pequeña, significa que las partículas de fluido no están girando y que el campo es irrotacional.

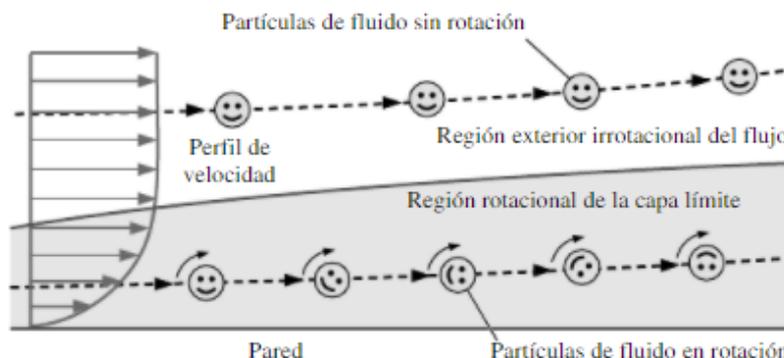


Figura 2.19. Diferencia entre flujo rotacional y el irrotacional. [Fuente: Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones 1ª edición]

Como podemos observar en la Figura 2.19, las partículas de fluido fuera de la capa límite son irrotacionales. Sin embargo, dentro de la capa límite son rotacionales. Cuando un flujo se aproxima a un objeto o pared, se produce vorticidad solo por la acción de la viscosidad. Sin efectos viscosos no se puede producir vorticidad en un flujo que de entrada es irrotacional.

3. FASE EXPERIMENTAL

3.1 Túnel de viento

Un túnel de viento es una herramienta desarrollada para ayudarnos en el estudio de los efectos que genera el aire alrededor de objetos sólidos. Mediante este instrumento podemos evaluar de manera fácil, rápida y económica el comportamiento de diferentes objetos, obteniendo resultados reales, precisos y detallados.

3.1.1 Túnel de viento utilizado

El túnel de viento que se ha utilizado en este proyecto es el que se muestra en la Figura 3.1. Se trata de un modelo “subsonic Wind Tunnel (AF300)” y se caracteriza por ser de circuito abierto, de cámara abierta y subsónico.

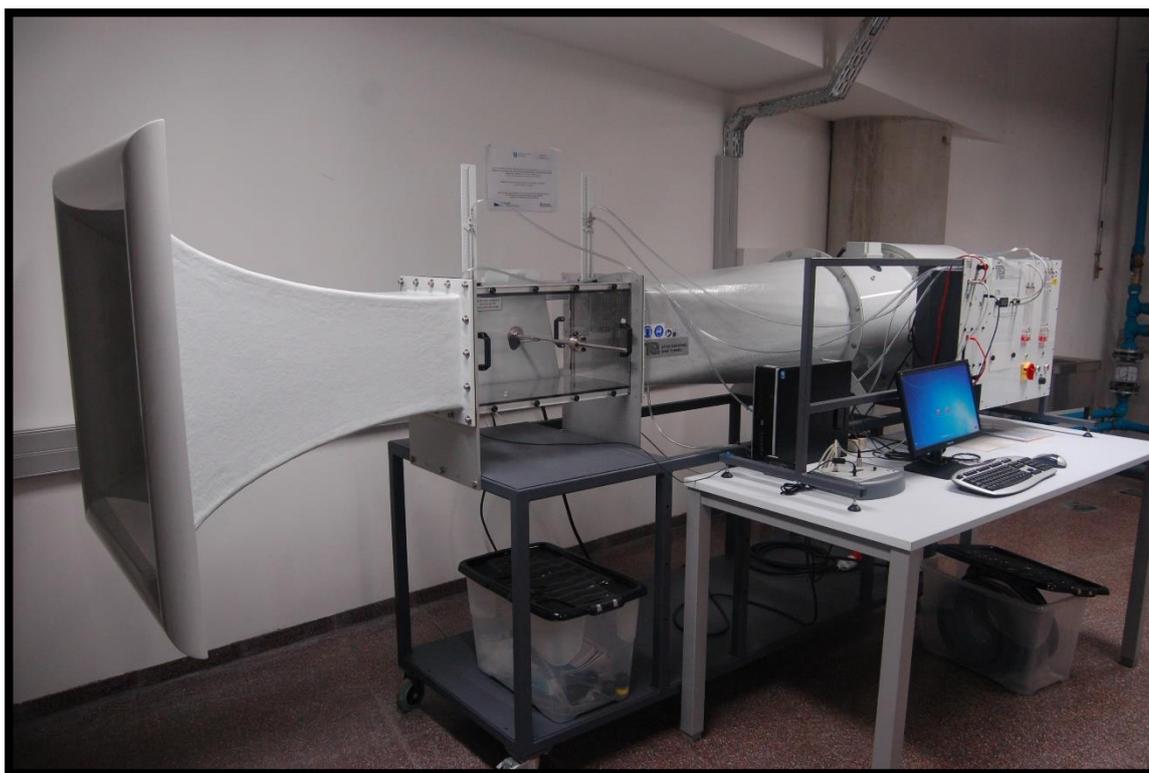


Figura 3.1. Túnel de viento utilizado.

De circuito abierto porque el aire se toma de la atmósfera, pasa por la cámara de ensayo y se devuelve a la atmósfera.

De cámara abierta porque la cámara de ensayo conecta con la entrada y/o salida del túnel de viento.

Subsónico porque su velocidad máxima es de 36 m/s. Podemos observar en la Figura 3.2 que para un número de Mach de hasta 0,7, un túnel de viento se considera subsónico. Puesto que la velocidad máxima de nuestro túnel de viento es de 36 m/s, a partir de la expresión 2.11:

$$Ma = \frac{36 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} = 0,1059 < 0,7$$

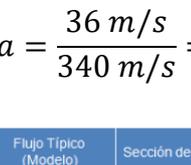
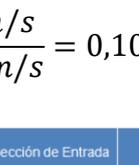
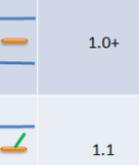
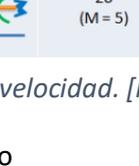
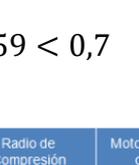
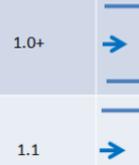
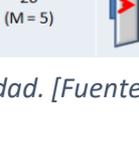
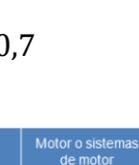
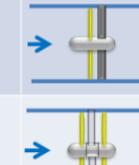
Régimen de Velocidad	Flujo Típico (Modelo)	Sección de Entrada	Radio de Compresión	Motor o sistemas de motor
Subsónico (M= 0 - 0.7)			1.0+	
Transónico (M= 0.7 - 1.2)			1.1	
Supersónico (M= 1.2 - 5)			2 (M = 2)	
Hipersónico (M > 5)			20 (M = 5)	

Figura 3.2. Tipos de túnel de viento según su velocidad. [Fuente:www.wikipedia.com]

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del túnel de viento

Dimensiones del equipo y peso	3700 mm x 1900 mm x 1065 mm. Peso 263 kg
Dimensiones de la sección de trabajo	305 mm x 305 mm x 600 mm
Velocidad nominal del aire	0 a 36 m/s
Tubo Pitot	Diámetro = 2 mm
Tubo Prandtl	Diámetro = 4 mm
Temperatura de trabajo	Entre 5 °C y 40 °C

3.1.2 Funcionamiento

El aire entra en el equipo a través de una tobera diseñada para acelerar en aire de manera lineal. A continuación, atraviesa un estabilizador de flujo de panel de abeja (Figura 3.3) y entra en la zona de trabajo, lugar donde se encuentra el cuerpo que se desea estudiar. Después, pasa por un panel antes del difusor que lo conduce hasta el ventilador axial de velocidad variable. Este panel sirve para proteger al ventilador de posibles daños producidos por objetos sueltos. El aire sale del ventilador, pasa por un silenciador y sale a la atmosfera.

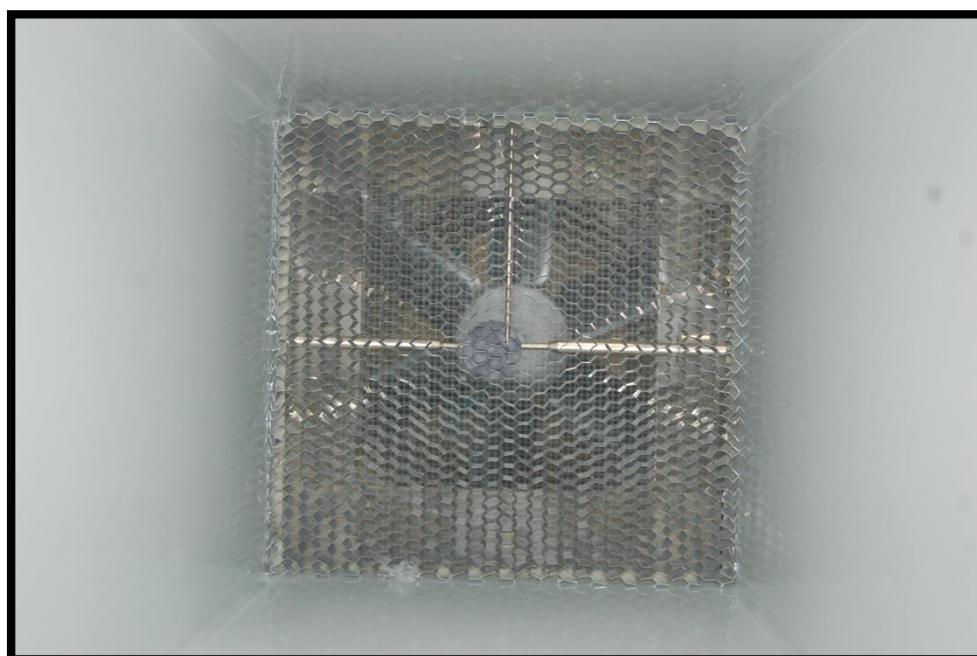


Figura 3.3. Panel de abeja del túnel de viento.

Una unidad de control e instrumentación, permite controlar la velocidad de giro del ventilador y por lo tanto la velocidad del aire a la sección de trabajo.

La sección de trabajo del túnel es de sección cuadrada con paredes lisas alrededor. Las paredes son de metacrilato y se pueden desmontar.

En la parte superior de la zona de ensayo, están instalados dos medidores que pueden desplazarse verticalmente. El primero es un tubo Pitot, que permite medir la

velocidad del aire aguas arriba a la entrada de la zona de trabajo. El segundo es un tubo Prandtl, que mide la velocidad aguas abajo de la zona de trabajo. Los dos medidores están conectados a dos manómetros de presión diferencial.

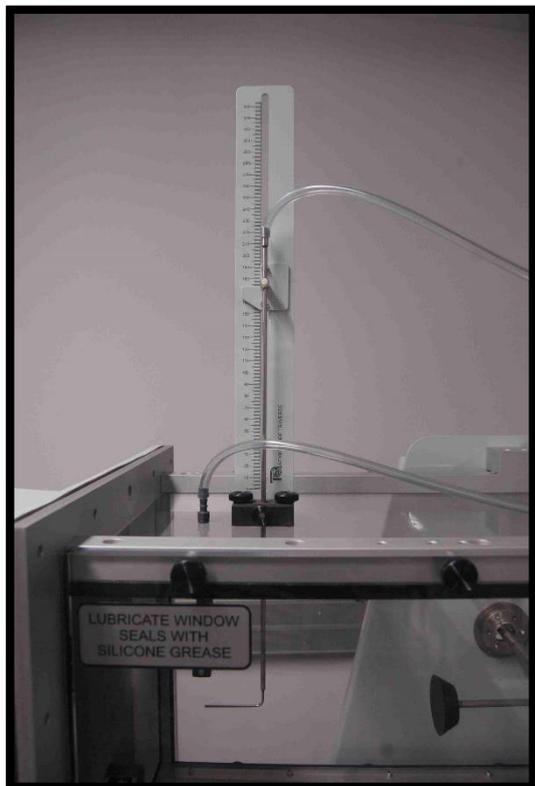


Figura 3.4. Tubo Pitot aguas arriba.

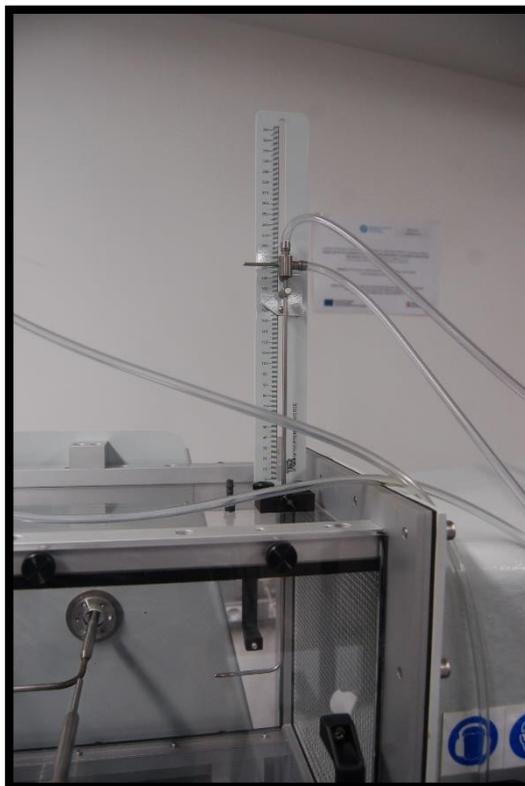


Figura 3.5. Tubo Prandtl aguas abajo.

Una balanza (Figura 3.7) se puede situar en una de las caras de la sección de trabajo del túnel de viento. La balanza mantiene el modelo en la sección de trabajo y mide las fuerzas de arrastre (drag) y de sustentación (lift) sobre el modelo, creadas por el paso del aire a su alrededor. La balanza está conectada a una unidad con display (Figura 3.6) digital que indica la fuerza medida. La balanza dispone de un dispositivo, el protractor, que permite controlar el ángulo de ataque del modelo a ensayar.

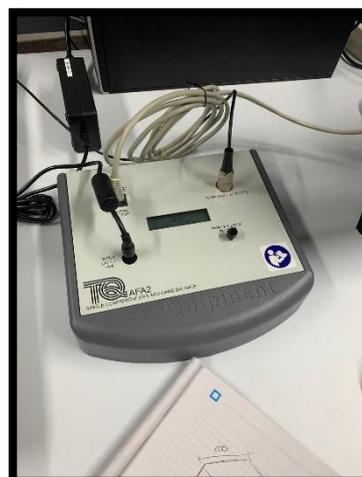


Figura 3.6. Display

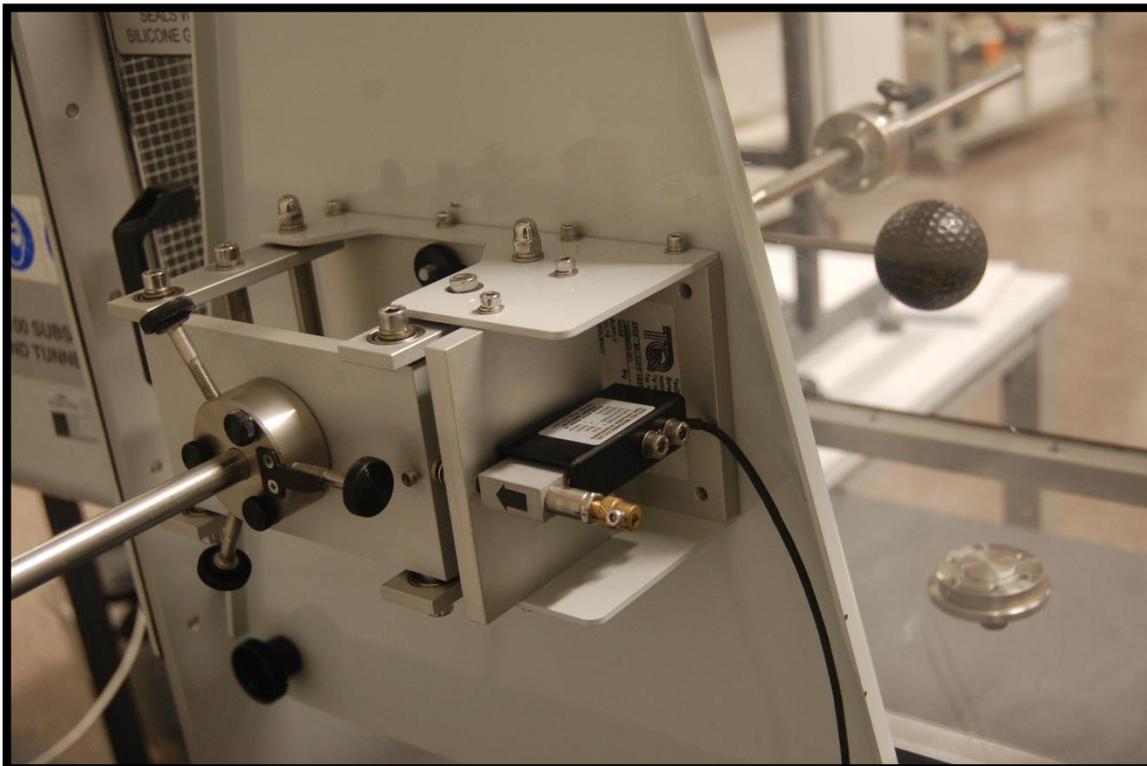


Figura 3.7. Balanza.

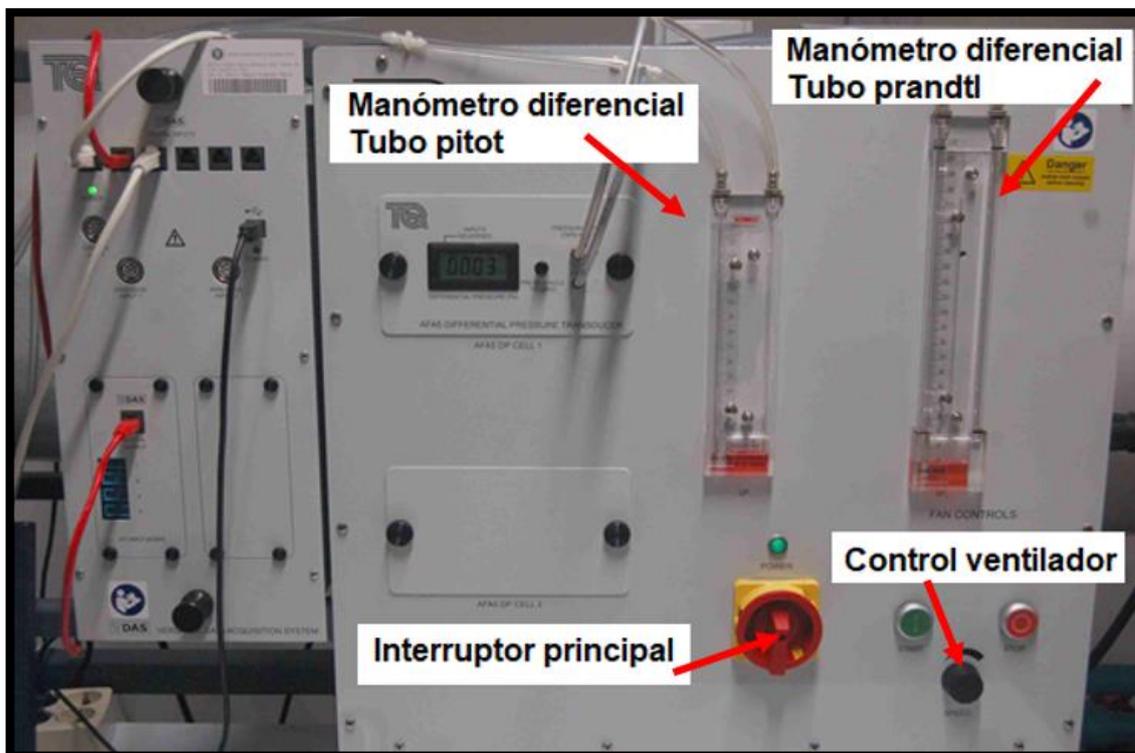


Figura 3.8. Sistema de control y medición.

3.2 Procedimiento

En este apartado se detallará el procedimiento seguido para la preparación y realización de los experimentos. Como bien se ha dicho anteriormente, en este proyecto se analizarán dos figuras: una esfera lisa y una media esfera (también lisa), ambas de 50 mm de diámetro. (Figuras 3.9 y 3.10).



Figura 3.9. Esfera lisa.



Figura 3.10. Media esfera.

1- Apuntar temperatura, presión atmosférica y humedad relativa del laboratorio.



Figura 3.11. Termómetro, medidor de humedad y barómetro del laboratorio.

- 2- Retirar la pared de metacrilato opuesta al dispositivo de la balanza.
- 3- Insertar la figura a analizar asegurándose de que queda colocada correctamente en el centro de la sección de trabajo y con un ángulo de ataque de 0° .

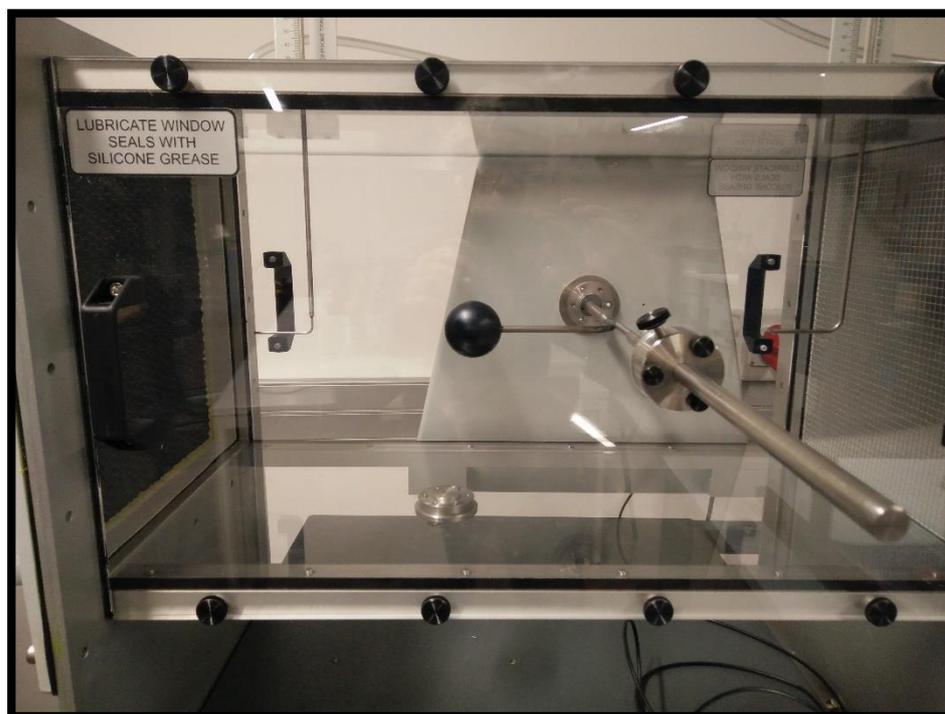


Figura 3.12. Esfera lisa colocada en la cámara de ensayo.

- 4- Volver a colocar la pared de metacrilato e introducir la barra dummy sin que toque la barra del modelo, dejando una separación de 1 mm. La función de la barra dummy es la de compensar las fuerzas que se generan a causa de la barra que sujeta el modelo a analizar.



Figura 3.13. Vista superior de la sección de trabajo con la esfera lisa colocada.

- 5- Ajustar el Pitot y el prandtl en el centro del túnel y poner en marcha el ventilador a la velocidad deseada.
- 6- Poner el tubo Pitot y el prandtl en la pared inferior del túnel.
- 7- Medir la presión dinámica en los manómetros diferenciales mostrados en la Figura 3.8.
- 8- Separar el Pitot y el prandtl 1mm de la pared y volver a medir la presión.
- 9- Continuar midiendo de milímetro en milímetro hasta unos 20 mm aproximadamente. Nos interesa hacer muchas mediciones cerca de la pared para observar los efectos de la capa límite. A partir de ahí, medir cada 5 mm hasta llegar al centro de la sección de trabajo. No es necesario hacer más mediciones por una cuestión de simetría.
- 10- Proceder a la medición de fuerzas. Poner en marcha la unidad con display y poner el medidor a CERO.
- 11- Comenzar midiendo las fuerzas sobre el modelo y repetir las medidas a diferentes velocidades de aire.
- 12- Cambiar de la báscula la barra modelo por la barra dummy y medir las fuerzas sobre la barra dummy.
- 13- Calcular la fuerza total sobre el cuerpo estudiado:

$$F_{total} = F_{modelo} - F_{dummy} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

- 14- Calcular el coeficiente de arrastre del cuerpo estudiado y de la barra dummy.

3.3 Resultados

En este apartado se mostrarán los datos obtenidos experimentalmente en el túnel de viento y los cálculos realizados a partir de éstos.

3.3.1 Determinación del coeficiente de arrastre

Una vez obtenidas las fuerzas de los dos modelos a estudiar y la barra dummy a diferentes velocidades de aire, podemos calcular los coeficientes de arrastre mediante la expresión 2.21. Por ejemplo, para la esfera lisa, a una velocidad de aproximadamente 30 m/s:

$$C_{D(Modelo)} = \frac{0,52}{\frac{1}{2} \cdot 1,1961 \cdot 30,0360^2 \cdot 0,0019635} = 0,49085$$

Podemos calcular el número de Reynolds y clasificar en qué estado se encuentra el aire, si laminar o turbulento, además de visualizar los efectos que éste tiene sobre el C_D . Para calcular el Re utilizamos la expresión 2.12 y 2.13:

$$Re = \frac{30,0360 \cdot 0,05}{15,05 \cdot 10^{-6}} = 99796,9 < 2 \cdot 10^5$$

$$v = \frac{1,8 \cdot 10^{-5}}{1,1961} = 15,05 \cdot 10^{-6}$$

También podemos calcular el número de Mach mediante la expresión 2.11:

$$Ma = \frac{30,0360}{340} = 0,088 \leq 0.3$$

Por lo tanto, como observamos en las tablas 3.2 y 3.4, para todas las velocidades ensayadas, tenemos un flujo laminar (porque el Reynolds es siempre menor a $2 \cdot 10^5$) e incompresible (porque Mach es siempre menor a 0,3).

- **Experimento 1: Esfera lisa**

Tabla 3.2. Determinación del coeficiente de arrastre de la esfera lisa.

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE									
Esfera lisa		D (mm)	50	A (m ²)	0,0019635				
Barra dummy		D (mm)	12	A (m ²)	0,001356				
Temp. amb	25	°C	Patm	1023	mbar				
densitat	1,1961	kg/m ³	viscositat	1,80E-05	Pa·s				
				Esfera lisa			Cilindre dummy		
Pitot	velocitat	F model lisa	F dummy lisa	F total lisa	Drag	Reynolds	Drag	Reynolds	Mach
Δp (mm.c.a)	c (m/s)	F (N)	F (N)	F (N)	Cd	Re	Cd	Re	Ma
5	9,0562	0,1	0,05	0,05	0,519160	30089,9	0,752	7221,6	0,027
10	12,8074	0,2	0,09	0,11	0,571076	42553,5	0,677	10212,9	0,038
15	15,6858	0,32	0,14	0,18	0,622992	52117,2	0,702	12508,1	0,046
20	18,1124	0,45	0,21	0,24	0,622992	60179,8	0,789	14443,2	0,053
25	20,2503	0,52	0,22	0,30	0,622992	67283,1	0,662	16147,9	0,060
30	22,1831	0,65	0,29	0,36	0,622992	73704,9	0,727	17689,2	0,065
35	23,9604	0,75	0,35	0,40	0,593326	79610,4	0,752	19106,5	0,070
40	25,6148	0,88	0,43	0,45	0,584055	85107,1	0,808	20425,7	0,075
45	27,1686	0,95	0,46	0,49	0,565307	90269,7	0,768	21664,7	0,080
50	28,6382	1,05	0,57	0,48	0,498393	95152,6	0,857	22836,6	0,084
55	30,0360	1,15	0,63	0,52	0,490842	99796,9	0,861	23951,3	0,088
60	31,3716	1,3	0,70	0,60	0,519160	104234,5	0,877	25016,3	0,092
65	32,6526	1,45	0,80	0,65	0,519160	108490,7	0,925	26037,8	0,096
70	33,8852	1,54	0,88	0,66	0,489494	112586,1	0,945	27020,7	0,100

Tabla 3.3. Coeficiente de arrastre según bibliografía.

Esfera-bibliografía	
Re	Cd
8,95E+03	0,366
1,17E+04	0,366
1,48E+04	0,395
2,10E+04	0,410
2,86E+04	0,426
3,60E+04	0,443
4,37E+04	0,443
5,73E+04	0,443
8,11E+04	0,426
1,00E+05	0,410
1,15E+05	0,410

Podemos comparar nuestros resultados experimentales con los datos que nos muestran las Figuras 2.13 y 2.14. Estos datos se recogen en la tabla 3.3.

En la Figuras 3.14 y 3.15 se muestran los valores experimentales de la fuerza de resistencia y del coeficiente de resistencia de la esfera lisa.

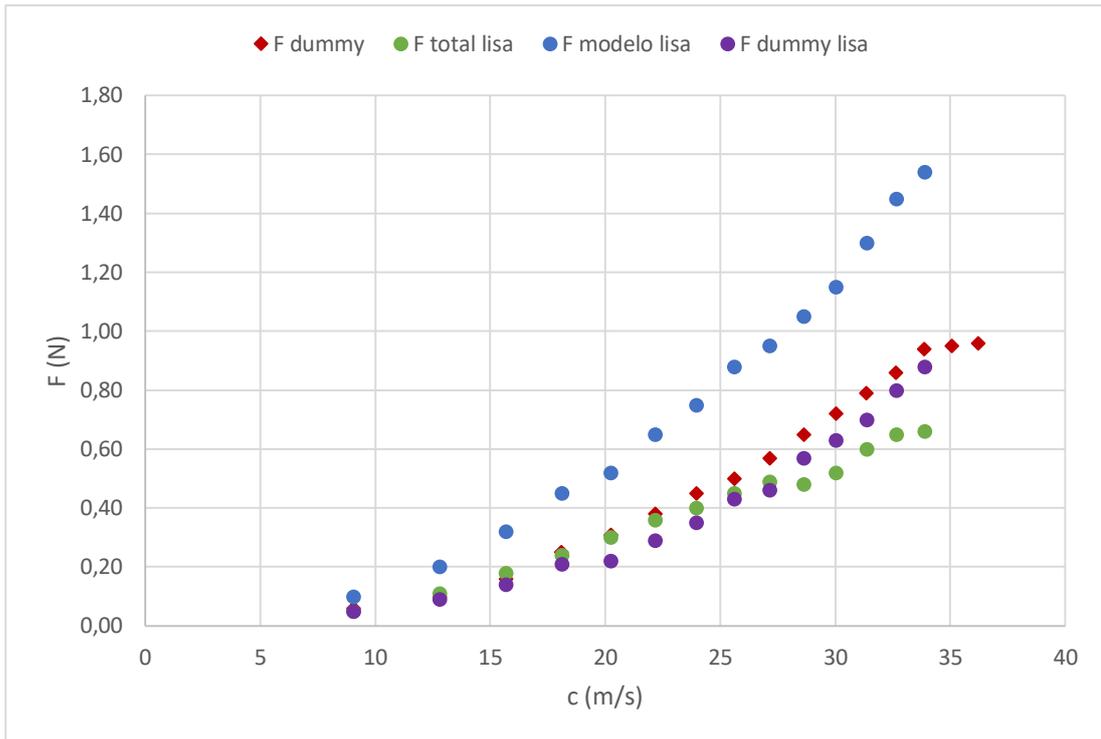


Figura 3.14. Fuerzas de arrastre del experimento 1.

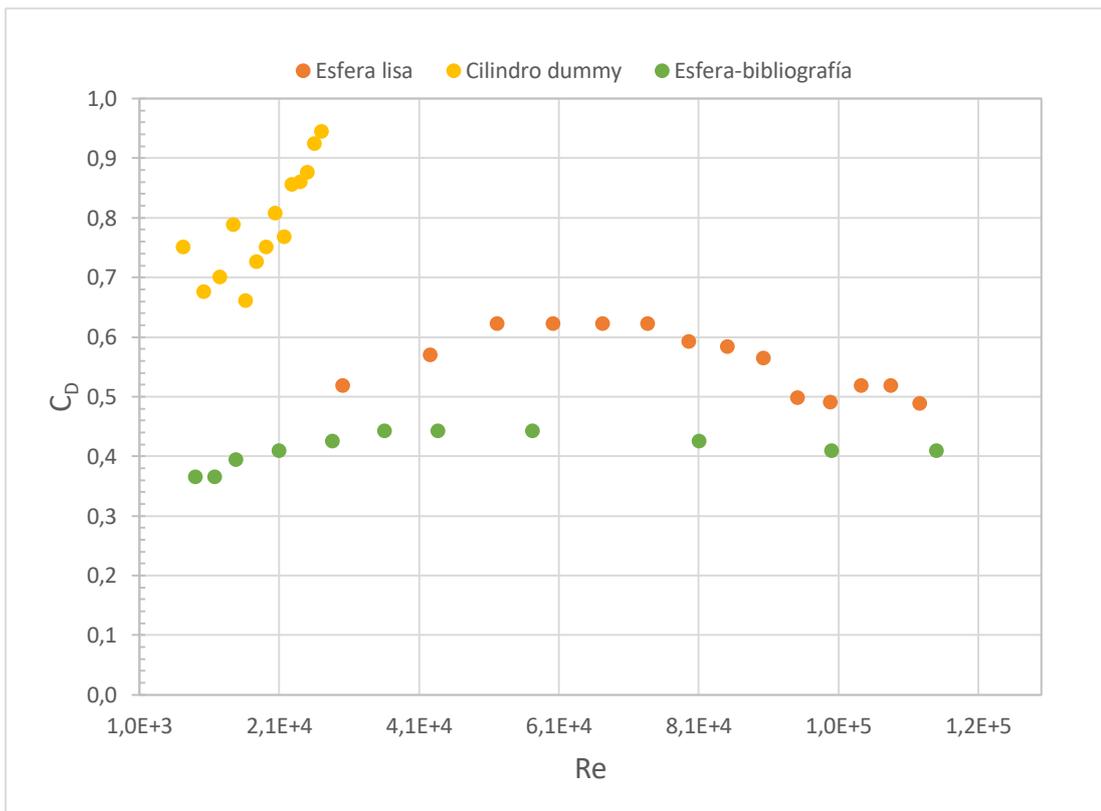


Figura 3.15. Coeficientes de arrastre experimento 1.

• **Experimento 2: Media esfera**

Tabla 3.4. Determinación del coeficiente de arrastre de la media esfera.

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE											
Media Esfera lisa		D (mm)	50	A (m ²)	0,0019635						
Barra dummy		D (mm)	12	A (m ²)	0,001356						
Temp. amb	23	°C		Pat m	1019	mbar					
densidad	1,1995	kg/m ³		viscosidad	1,80E-05	Pa·s					
		Media esfera							Barra dummy		
Pitot	velocidad	F modelo	F dummy	F total	Drag	Reynold s	teórico	Drag	Reynold s	Mach	
Δp(mm.c.a)	c (m/s)	F (N)	F (N)	F (N)	Cd	Re	Cd	Cd	Re	Ma	
1	5	9,0435	0,11	0,05	0,06	0,631000	30132,3	0,266	0,740	7231,8	0,027
2	10	12,7894	0,22	0,11	0,11	0,581181	42613,5	0,254	0,812	10227,2	0,038
3	15	15,6637	0,32	0,17	0,15	0,526979	52190,7	0,247	0,841	12525,8	0,046
4	20	18,0869	0,42	0,23	0,19	0,498720	60264,6	0,242	0,857	14463,5	0,053
5	25	20,2218	0,54	0,29	0,25	0,522705	67377,9	0,238	0,867	16170,7	0,059
6	30	22,1518	0,63	0,35	0,28	0,486428	73808,8	0,236	0,874	17714,1	0,065
7	35	23,9267	0,75	0,41	0,34	0,504788	79722,6	0,233	0,880	19133,4	0,070
8	40	25,5787	0,82	0,47	0,35	0,453505	85227,0	0,231	0,884	20454,5	0,075
9	45	27,1304	0,92	0,53	0,39	0,448115	90396,9	0,229	0,888	21695,3	0,080
10	50	28,5979	1,05	0,59	0,46	0,474865	95286,7	0,227	0,891	22868,8	0,084
11	55	29,9937	1,17	0,65	0,52	0,487246	99937,5	0,226	0,894	23985,0	0,088
12	60	31,3274	1,29	0,72	0,57	0,497510	104381,4	0,225	0,896	25051,5	0,092
13	65	32,6066	1,4	0,78	0,62	0,498165	108643,6	0,223	0,898	26074,5	0,096
14	70	33,8375	1,5	0,84	0,66	0,491274	112744,7	0,222	0,900	27058,7	0,100
15	75	35,0251	1,6	0,90	0,70	0,485273	116701,9	0,221	0,901	28008,5	0,103

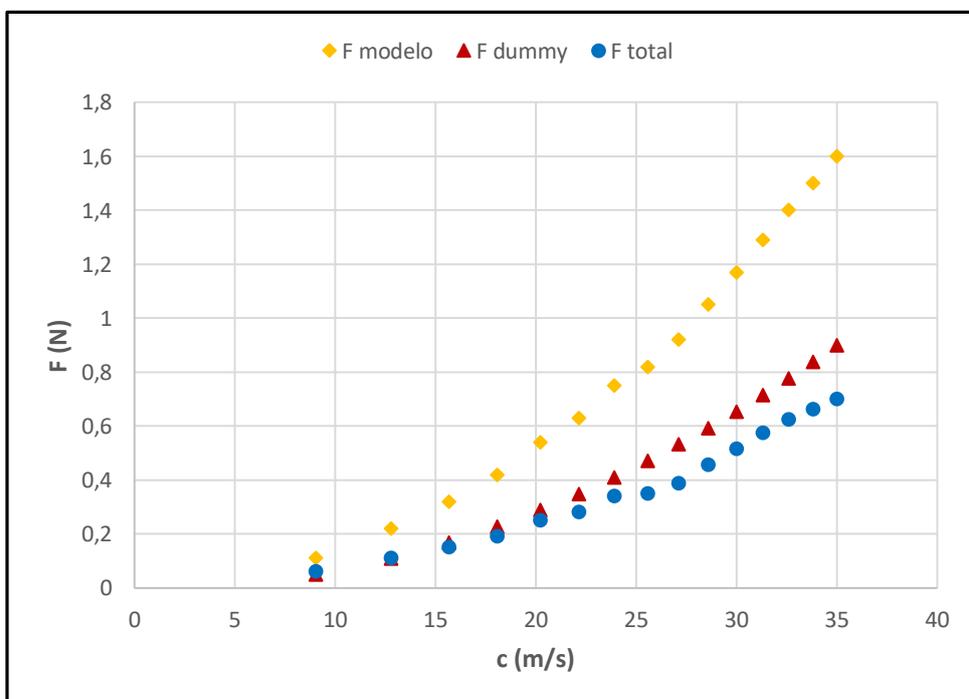


Figura 3.16. Fuerzas de arrastre del experimento 1.

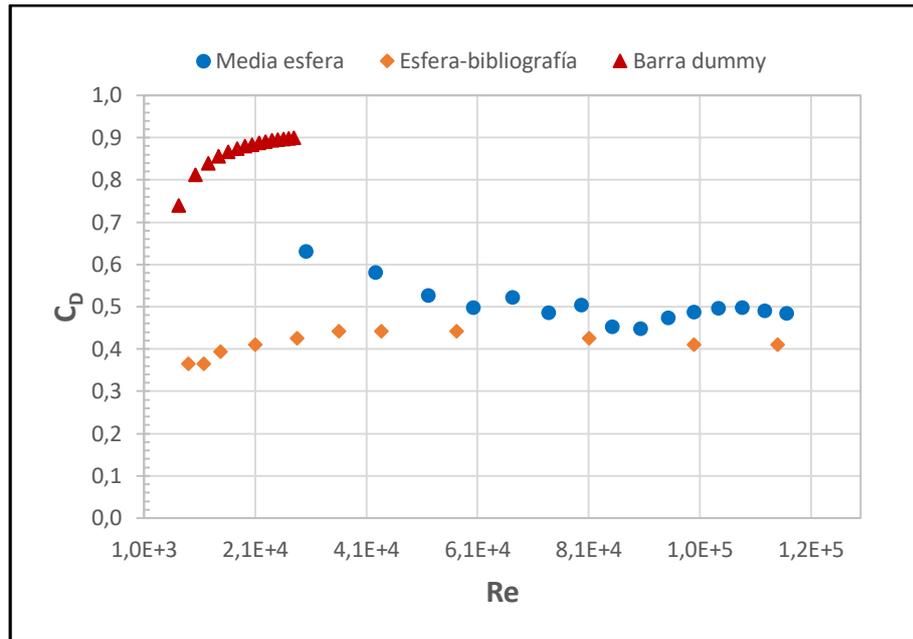


Figura 3.17. Coeficientes de arrastre experimento 1.

En la Figuras 3.16 y 3.17 se muestran los valores experimentales de la fuerza de resistencia y del coeficiente de resistencia de la media esfera lisa.

De los datos recogidos y las gráficas realizadas observamos varias cosas.

- Los coeficientes de arrastre de la media esfera y la esfera lisa no distan demasiado entre ellas. Esto es debido a que el área de la sección transversal de la media esfera y la esfera son la misma, ergo como en todos los casos nos encontramos en un estado laminar, el desprendimiento de la capa límite se produce aproximadamente en el mismo punto. Esto lo comprobaremos más adelante en el análisis computacional.
- La fuerza de arrastre aumenta significativamente a más velocidad de aire, sin embargo, el coeficiente de arrastre disminuye ligeramente. Como la fuerza de arrastre es proporcional al cuadrado de la velocidad, una disminución del coeficiente de arrastre no implica una disminución del arrastre.
- Nos encontramos en el rango moderado de $10^3 < Re < 10^5$ (ver Figura 2.14), el coeficiente de arrastre permanece relativamente constante.

3.3.2 Perfil de velocidades

Con los tubos pitot y prandtl podemos determinar la presión dinámica y la velocidad del fluido mediante la siguiente expresión:

$$c = \sqrt{\frac{2(\Delta p)}{\rho_a}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

La caída de presión, Δp , se determina a partir de la lectura de Δh en el manómetro diferencial, donde ρ_a , es la densidad del aire:

$$\Delta p = \rho g \Delta h \quad (\text{Ec. 3.3})$$

La densidad del aire con $R'_a = 287 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$:

$$\rho_a = \frac{p_a}{R'_a \cdot T_a} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde p_a y T_a son presión atmosférica y temperatura ambiente respectivamente.

En la tabla 3.5 y la Figura 3.18 se muestran los valores experimentales de la velocidad aguas arriba y aguas debajo de la esfera lisa. En la tabla 3.6 y la Figura 3.19 se muestran los valores experimentales de la velocidad aguas arriba y aguas debajo de la media esfera lisa.

Tabla 3.5. Perfil de velocidades esfera lisa.

Esfera lisa $c = 30 \text{ m/s}$

LISA-AIGUAS ARRIBA				LISA AIGUAS ABAJO			
y (mm)	Δp (mm.c.a.)	y real (mm)	c (m/s)	y (mm)	Δp (mm.c.a.)	y real (mm)	c (m/s)
0	25	1	20,250	0	28	2	21,431
1	25	2	20,250	1	32	3	22,911
2	27	3	21,045	2	33	4	23,266
3	30	4	22,183	3	36	5	24,300
4	30	5	22,183	4	39	6	25,293
5	31	6	22,550	5	41	7	25,933
6	31	7	22,550	6	42	8	26,247
7	33	8	23,266	7	44	9	26,865
8	35	9	23,960	8	45	10	27,169
9	37	10	24,636	9	45	11	27,169
10	38	11	24,966	10	45	12	27,169
11	40	12	25,615	11	48	13	28,060
12	43	13	26,558	12	48	14	28,060
13	44	14	26,865	13	50	15	28,638
14	44	15	26,865	14	51	16	28,923
15	46	16	27,469	15	52	17	29,205
35	55	36	30,036	35	59	37	31,109
55	55	56	30,036	55	60	57	31,372
75	54	76	29,762	75	60	77	31,372
95	57	96	30,577	95	58	97	30,844
115	50	116	30,621	115	54	117	29,762
135	57	136	30,577	135	46	137	27,469
155	55	156	30,036	155	47	156	27,766

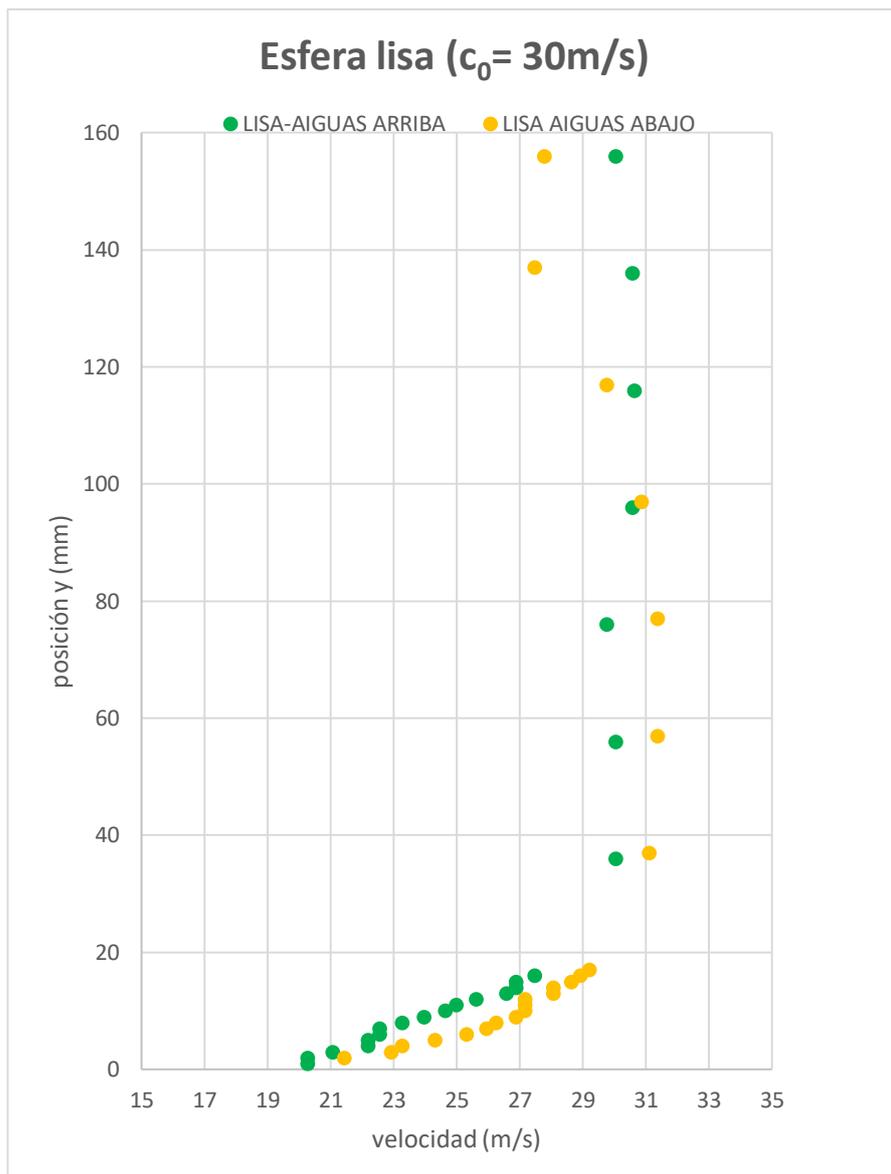


Figura 3.18. Comparación del perfil de velocidades aguas arriba y aguas abajo de la esfera lisa.

Tabla 3.5. Perfil de velocidades media esfera.

MITJA ESFERA				C ₀ =30m/s			
AGUAS ARRIBA				AGUAS ABAJO			
y (mm)	Δp (mm.c.a.)	y real (mm)	c (m/s)	y (mm)	Δp (mm.c.a.)	y real (mm)	c (m/s)
0	24	1	19,813	0	29	2	21,780
1	24	2	19,813	1	31	3	22,518
2	26	3	20,622	2	33	4	23,233
3	28	4	21,401	3	35	5	23,927
4	31	5	22,518	4	37	6	24,601
5	33	6	23,233	5	39	7	25,257
6	35	7	23,927	6	40	8	25,579
7	37	8	24,601	7	41	9	25,897
8	39	9	25,257	8	42	10	26,210
9	42	10	26,210	9	44	11	26,827
10	44	11	26,827	10	45	12	27,130
11	46	12	27,430	11	46	13	27,430
12	47	13	27,727	12	47	14	27,727
13	47	14	27,727	13	49	15	28,310
14	44	15	26,827	14	50	16	28,598
15	46	16	27,430	15	51	17	28,882
20	57	21	30,534	20	54	22	29,720
25	51	26	28,882	25	55	27	29,994
35	58	36	30,801	35	57	37	30,534
55	49	56	28,310	55	57	57	30,534
75	54	76	29,720	75	57	77	30,534
95	57	96	30,534	95	57	97	30,534
115	50	116	28,598	115	52	117	29,164
135	55	136	29,994	135	43	137	26,521
155	56	156	30,265	155	43	156	26,521

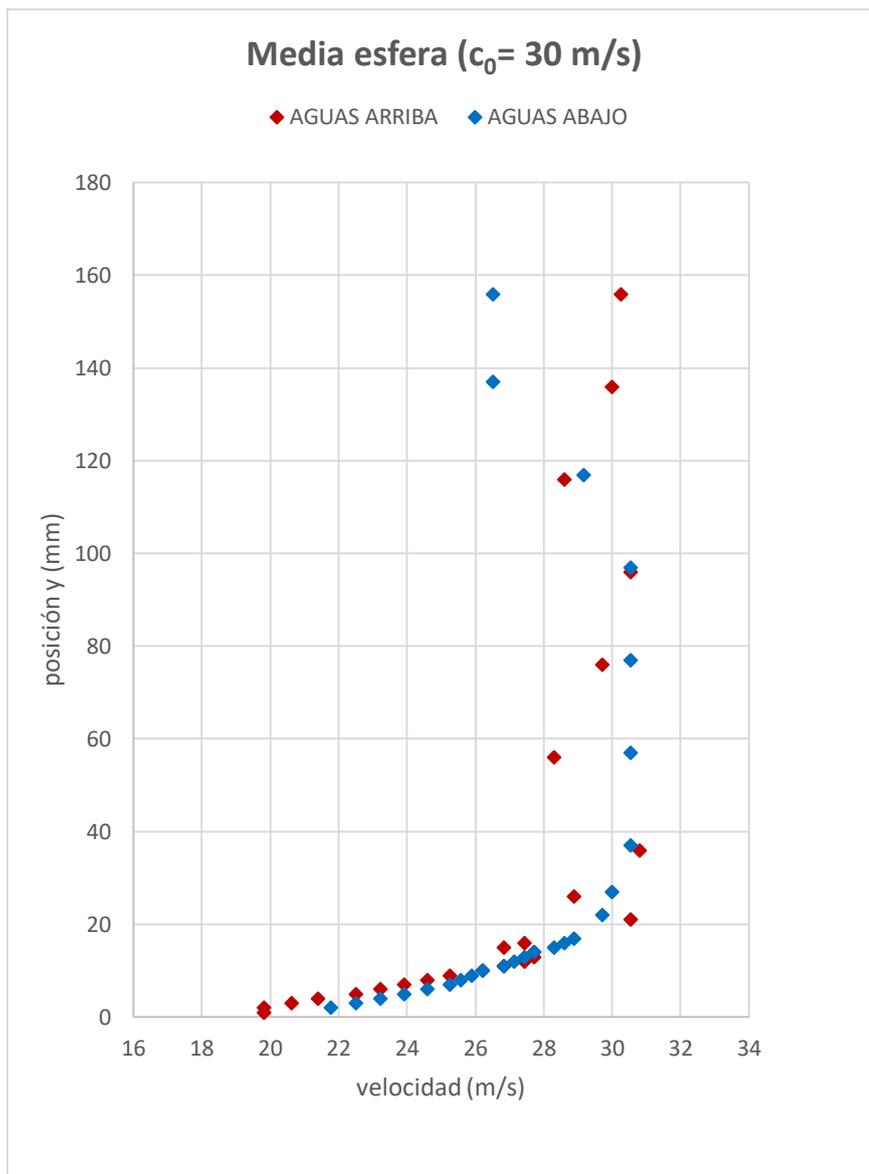


Figura 3.19. Comparación del perfil de velocidades aguas arriba y aguas abajo de la media esfera.

En ambos perfiles de velocidad observamos:

- Los efectos de la capa límite producidos por el suelo de la cámara de trabajo. El fluido en la superficie porta una velocidad nula y va aumentando progresivamente hasta alcanzar la velocidad inicial de entrada aproximadamente.
- Podemos apreciar que la capa límite tiene una anchura de unos 20 mm aproximadamente.
- El perfil de aguas abajo presenta una disminución de velocidades justo cuando llegamos a la altura del sólido. En el análisis computacional veremos porqué.

4. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

El CFD es una herramienta informática utilizada para entender y predecir el comportamiento de un fluido en unas condiciones determinadas.

Podríamos estudiar este comportamiento en cada punto del fluido aplicando las ecuaciones de Navier-Stokes, pero como son demasiado complejas se recurre a las simulaciones numéricas.

El tipo de CFD más utilizado es el de “Volúmenes Finitos”, que consiste en dividir el fluido en pequeños “bloques” y simular el comportamiento en cada uno de sus vértices. De esta manera pasamos de analizar “infinitas” moléculas de fluido a un número finito de ellas.

Existen varias opciones para realizar las simulaciones, pero en este trabajo se utilizará el software de CFD ANSYS FLUENT.

A continuación, se mostrarán todos los pasos que se han seguido para realizar el análisis computacional.

4.3 Esfera lisa

Podemos dividir todo el proceso en 5 fases: modelado, mallado, ajuste de parámetros, ejecución de la simulación y análisis de los resultados.

4.3.1 Modelado

El primer paso en el análisis es la construcción o importación del modelo a estudiar. En nuestro caso, construiremos el modelo 3D mediante el programa de CAD SolidWorks y posteriormente lo importaremos en ANSYS.

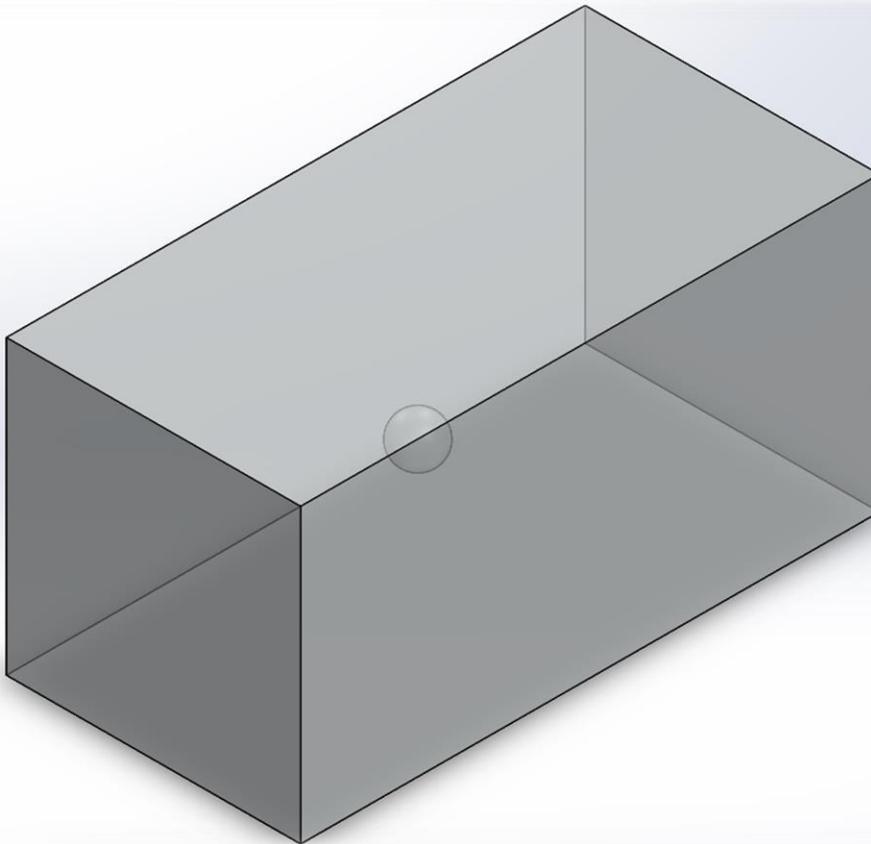


Figura 4.1. 3D Vista isométrica de la esfera lisa

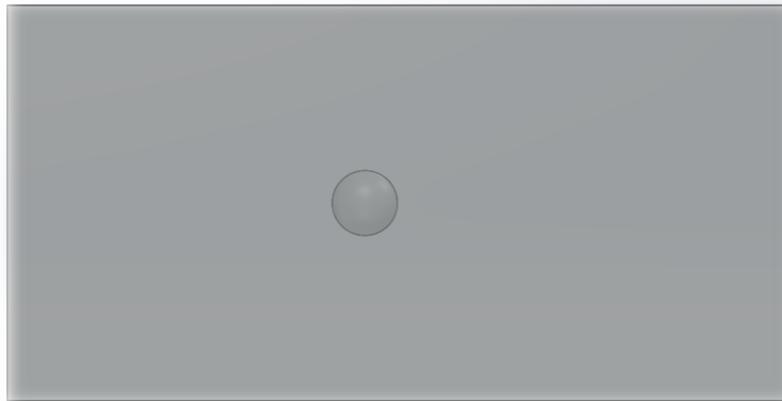


Figura 4.2. 3D Vista lateral de la esfera lisa.

Éste sería el diseño que posteriormente se importará en ANSYS. Se ha dibujado un volumen rectangular que representa la cámara de ensayo del túnel de viento. Dentro de este volumen se encuentra la esfera lisa, de 50 mm de diámetro, que como podemos observar en la Figura 4.2, no se encuentra en el centro. Esta es la posición en la que se encuentra la esfera en el túnel de viento.

Las dimensiones de las geometrías con las barras y la posición de éstas en la cámara de ensayo se encuentran dibujadas en 2D en los anexos de este trabajo.

Una vez en ANSYS, importamos el archivo de SolidWorks. Pero antes de empezar con el mallado es necesario hacer algo importante. El modelo sobre el que hacer simulaciones ha de tener una particularidad, tiene que ser una superficie, no un volumen. Así que dentro de ANSYS-Geometry aplicaremos la función “Boolean”, la cual extraerá el volumen de la esfera del volumen de la cámara. El resultado pues, es el de un prisma con el hueco de la esfera (Figura 4.4).

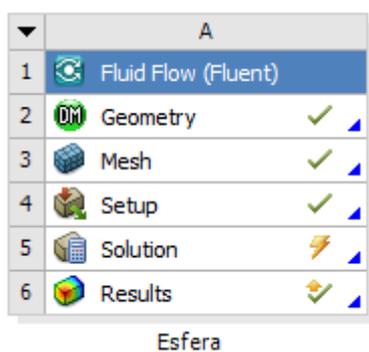


Figura 4.3. Menú ANSYS.

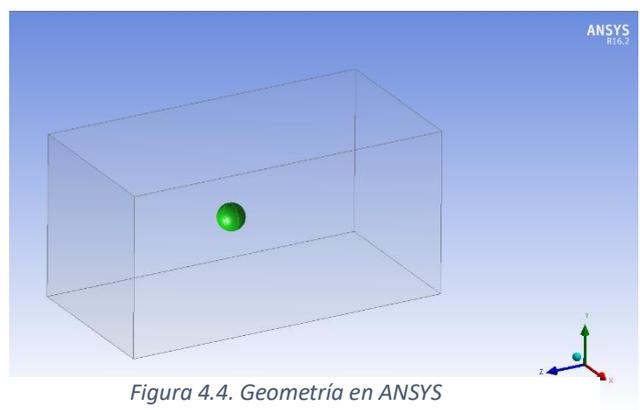


Figura 4.4. Geometría en ANSYS

4.3.2 Mallado

Una vez que la geometría esta lista podemos proceder con el mallado. Como ya hemos comentado, el mallado consiste en dividir el modelo en pequeños volúmenes. De cada bloque que se genera, se calculan las condiciones del fluido en los vértices y a partir de ahí se interpola entre todos los vértices para extraer información del fluido en todo el volumen. Cuantos más bloques tengamos, o cuanto más fina sea la malla, más precisa será la solución, pero aumentará a cambio el coste computacional. Esto se traduce en que el programa tardaría mucho más en obtener los resultados de la simulación. Por lo tanto, es clave diseñar una malla óptima que nos dé unos resultados que se ajusten a nuestro problema sin que ocasione un excesivo coste computacional.

Una vez dicho esto, abrimos el menú “Mesh” de ANSYS y nos disponemos a realizar la malla. El programa nos permite generar distintos tamaños de malla en nuestro modelo. Gracias a esto, podemos generar una malla más fina en la superficie de la esfera que en el resto del volumen de la cámara de ensayo.

Además, como vemos en la Figura 4.5, podemos generar una capa límite alrededor de la esfera para obtener en esa zona una mayor precisión en nuestros resultados. Esto es muy importante, puesto que lo que más nos interesa es ver qué sucede alrededor de nuestra figura. De la misma manera, generamos una capa límite para las paredes de la cámara.

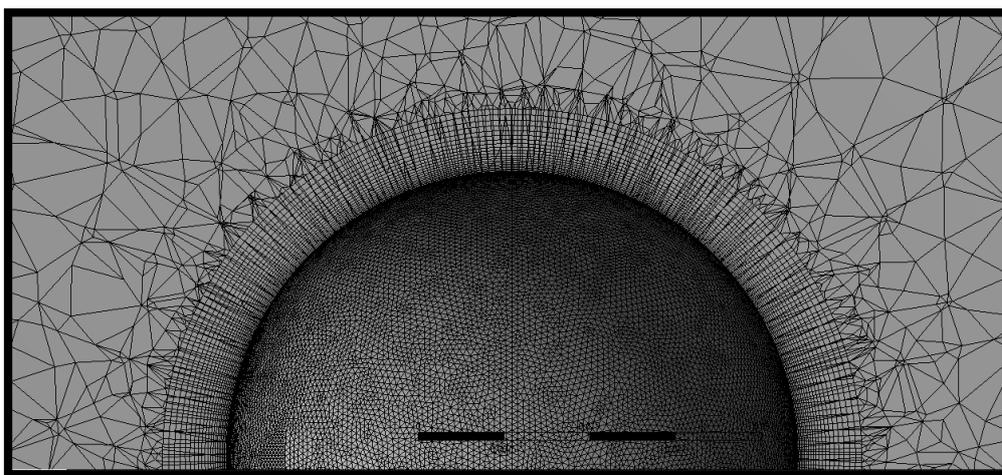


Figura 4.5. Malla en la esfera y alrededores.

En la Figura 4.6 se muestra el mallado total. Se puede observar como la malla alrededor de la esfera es mucho más fina que en el resto.

La primera malla realizada consiste en una malla de 3mm para la esfera y 10mm para la cámara de ensayo. Esto quiere decir que el tamaño de los “bloques” era de 3mm y 10mm respectivamente. La idea es hacer una primera simulación con esta malla e ir afinándola hasta que no se produzcan cambios importantes en los resultados. Ése será el momento en el que sabremos cuál es la malla óptima para nuestro problema. A lo largo de este trabajo se nombrarán las diferentes mallas de la siguiente forma: MallaEsfera/MallaCámara. Por ejemplo: 3mm/10mm.

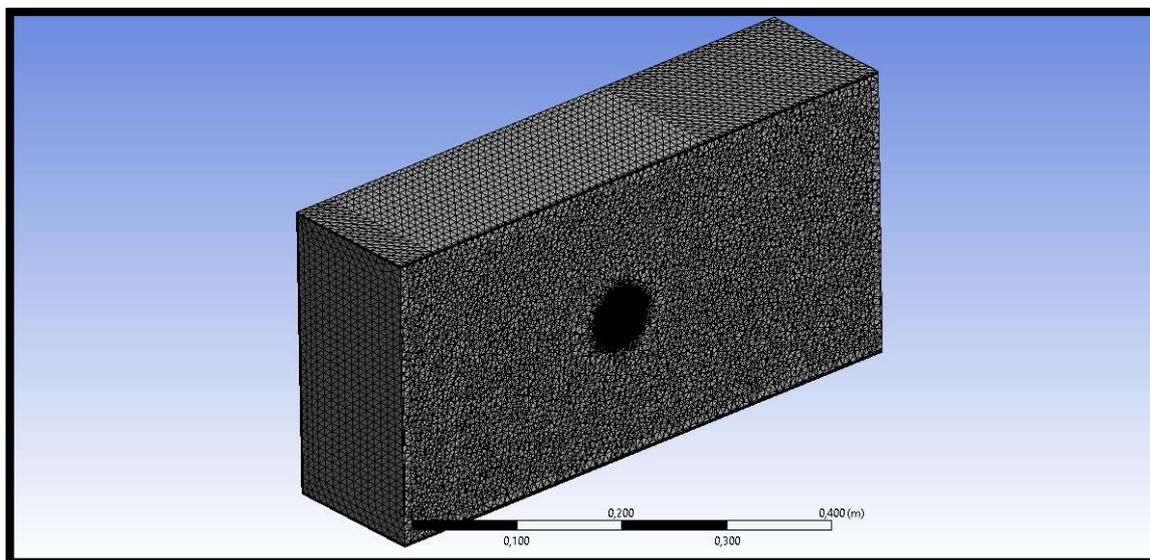


Figura 4.6. Mallado total esfera lisa.

4.3.3 Ajuste de parámetros y configuraciones de malla

Una vez realizada la malla debemos ajustar las condiciones de trabajo (densidad, viscosidad, velocidad de entrada del aire...) y el modelo de turbulencia antes de iniciar la simulación. ANSYS Fluent ofrece una gran variedad de modelos de turbulencia, pero en este proyecto sólo vamos a trabajar con dos: SST k- ω (Shear Stress Transport) y SAS (Scale Adaptive Simulation). Con el primero de ellos trabajaremos en estado estacionario, lo que implica una invariancia de las características del fluido respecto al tiempo. Por el contrario, con el modelo SAS trabajaremos en modo transitorio. Primeramente, se harán varias simulaciones con el modelo SST k- ω hasta encontrar la malla óptima.

♣ 1ª simulación

- Malla: 3mm/10mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Estacionario.
- Modelo de turbulencia: SST k- ω .
- $C_D = 3,36$ e-01.

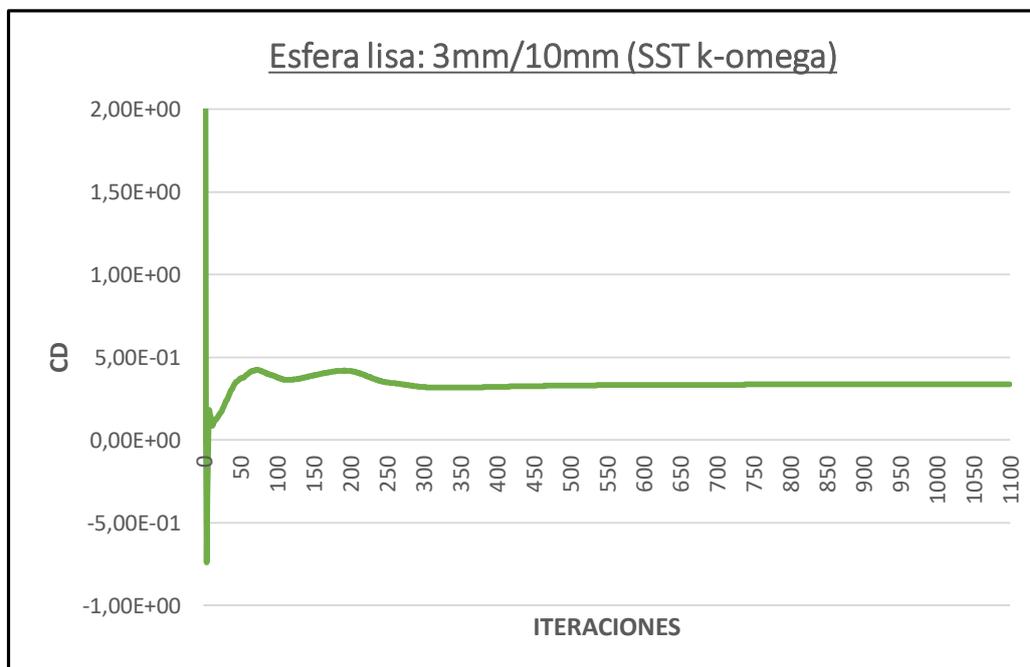


Figura 4.7. C_D de la esfera lisa. 1ª simulación

Vemos en la Figura 4.7 como el C_D converge volviéndose constante debido a que estamos suponiendo un modelo estacionario.

♣ 2ª simulación

- Malla: 3mm/7mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Estacionario.
- Modelo de turbulencia: SST k- ω .
- $C_D = 3,28 \text{ e-}01$.

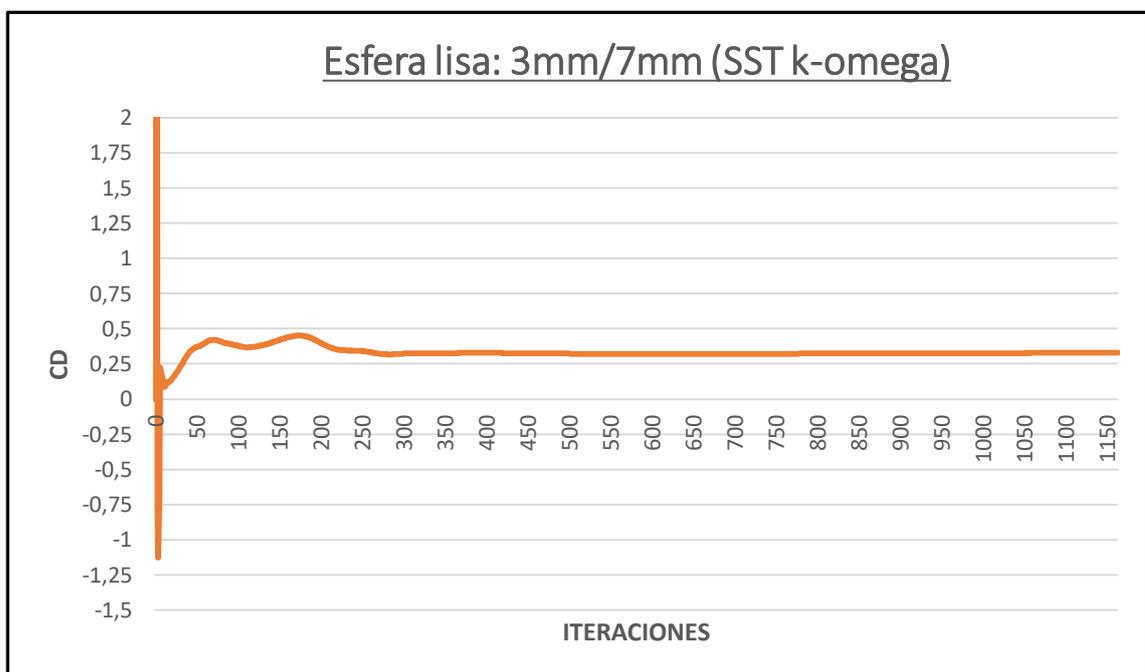


Figura 4.8. C_D de la esfera lisa. 2ª simulación

Probamos una malla más fina en la cámara y observamos (Figura 4.8) que el C_D varía ligeramente. Por lo tanto, escogemos una malla de 10mm para la cámara.

Ahora solo nos falta ver como varía el C_D cuando afinamos la malla alrededor de la esfera.

♠ 3ª simulación

- Malla: 2mm/10mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Estacionario.
- Modelo de turbulencia: SST k- ω .
- $C_D = 3,27$ e-01.

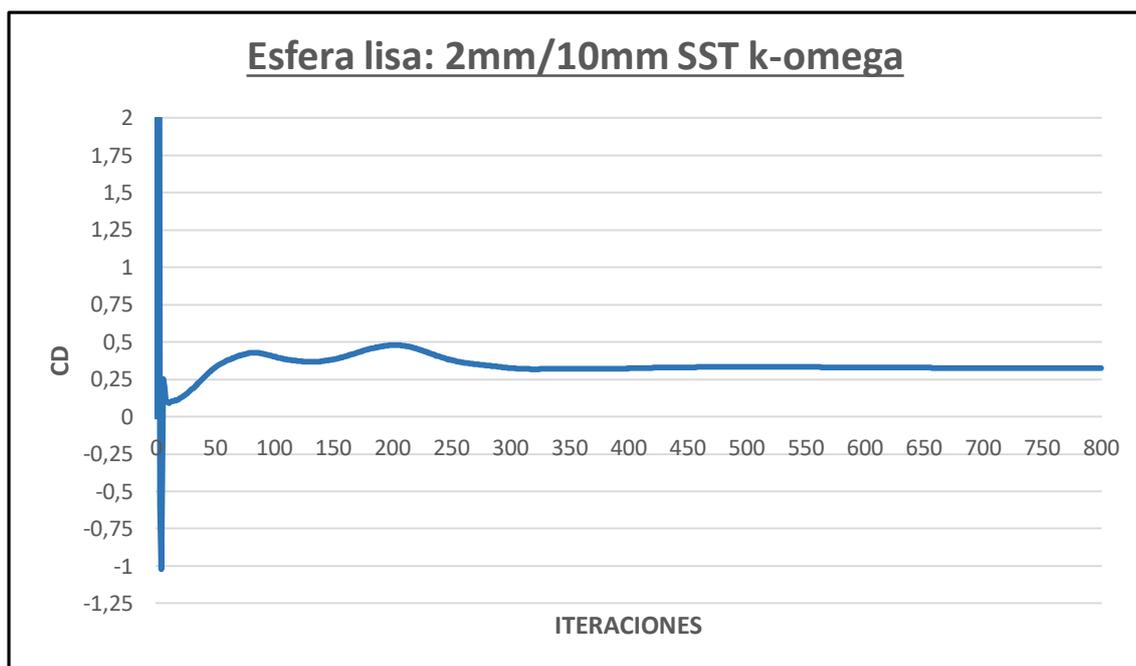


Figura 4.9. C_D de la esfera lisa. 3ª simulación

En la Figura 4.9 no observamos variaciones en el C_D con respecto a la malla con 3mm alrededor de la esfera, así que escogemos finalmente la malla de 3mm/10mm para empezar las simulaciones en estado transitorio. De todas maneras, vemos que con todas las simulaciones hasta el momento estamos lejos del C_D experimental para una velocidad de 30 m/s. Como podemos observar en la tabla 3.1 el C_D experimental es de 0,49.

♣ 4ª simulación

- Malla: 3mm/10mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Transitorio.
- Modelo de turbulencia: SAS.
- C_D promedio = $3,20 \text{ e-}01$.

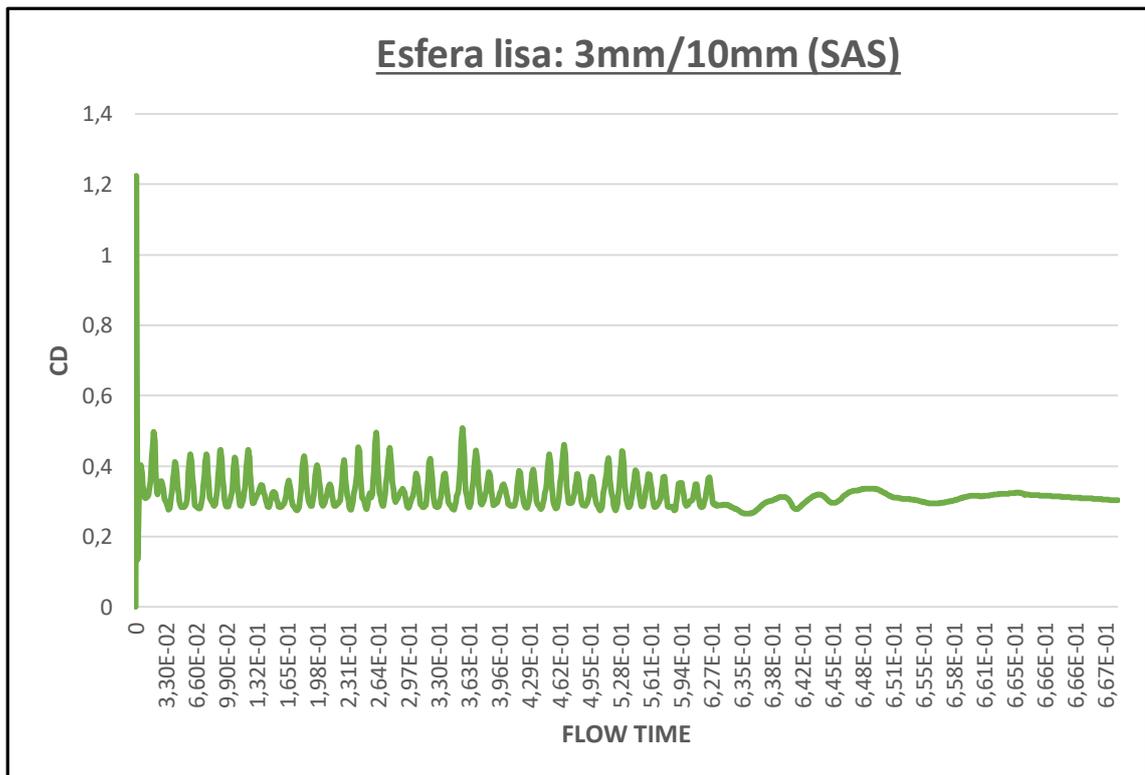


Figura 4.10. C_D de la esfera lisa. 4ª simulación

Vemos en la Figura 4.10 que utilizando un método transitorio el C_D fluctúa. Cuando se disminuye el salto en el tiempo en cada iteración, las fluctuaciones se van amortiguando hasta casi converger. Obtenemos un C_D promedio de $3,20\text{e-}01$, un valor todavía bajo respecto el experimental, por lo tanto, decidimos afinar mucho la malla alrededor de la esfera para ver si obtenemos mejores resultados.

▲ 5ª simulación

- Malla: 0,25mm/5mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Transitorio.
- Modelo de turbulencia: SAS.
- C_D promedio = 3,71 e-01.

Después de varias simulaciones, realizamos una malla final con 0,25 mm/5mm. Antes de llegar hasta aquí, se hicieron dos simulaciones más con 1mm y 0,5 mm alrededor de la esfera. Al observar que afinando la malla alrededor de la esfera el C_D aumentaba y fluctuaba cerca de 4,0 e-01 (Figura 4.11), decidimos poner en marcha esta última malla, aunque el coste computacional que conllevaba era muy elevado. La malla de 5mm de la cámara se escogió para que posteriormente los mapas de velocidad y presión estuvieran mucho más detallados.

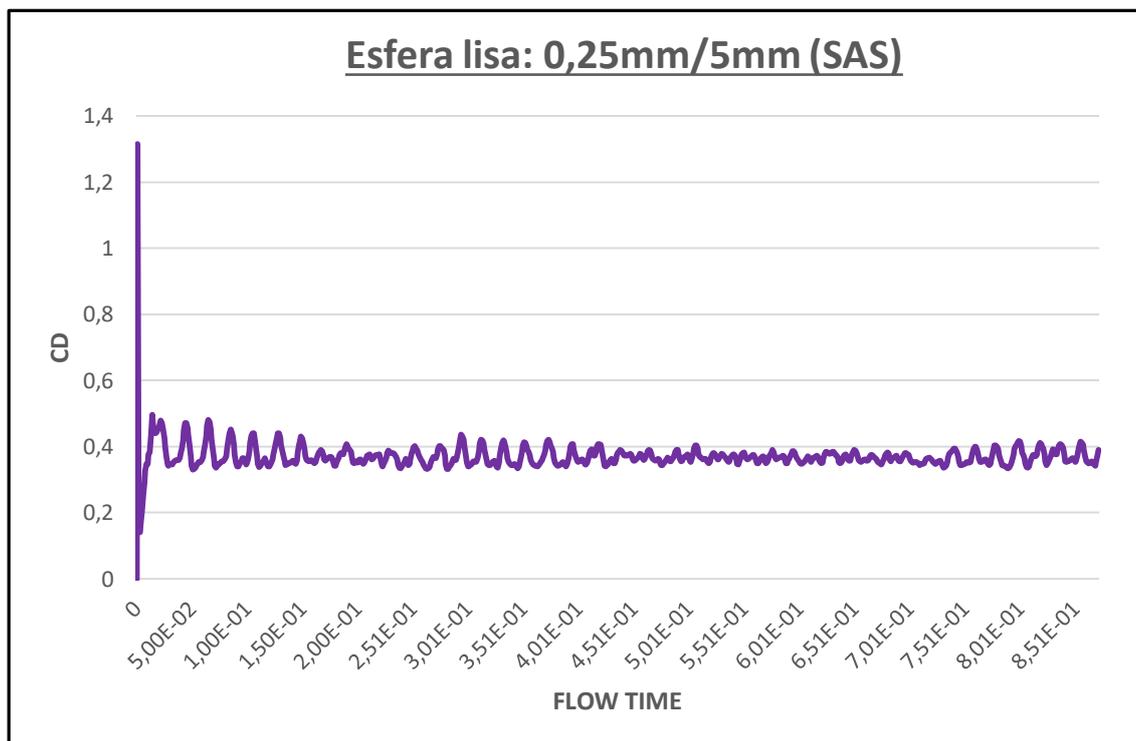


Figura 4.11. C_D de la esfera lisa. 5ª simulación

Por último, se realizaron dos simulaciones más para una velocidad de 20 m/s y 10 m/s con una malla de 0,5mm/7mm.

♣ 6ª simulación

- Malla: 0,5mm/7mm.
- Velocidad $c_0 = 20$ m/s.
- Régimen: Transitorio.
- Modelo de turbulencia: SAS.
- C_D promedio = 4,01 e-01.

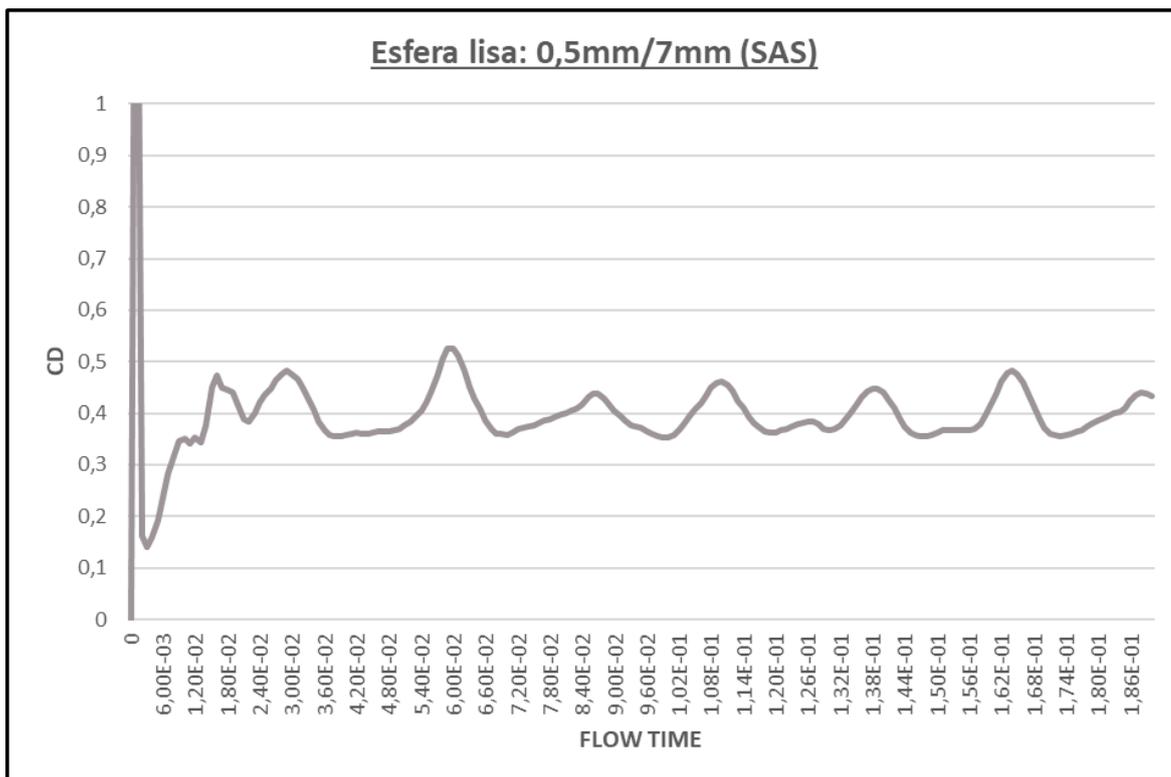


Figura 4.12. C_D de la esfera lisa. 6ª simulación

▲ 7ª simulación

- Malla: 0,5mm/7mm.
- Velocidad $c_0 = 10$ m/s.
- Régimen: Transitorio
- Modelo de turbulencia: SAS.
- C_D promedio = 4,72 e-01

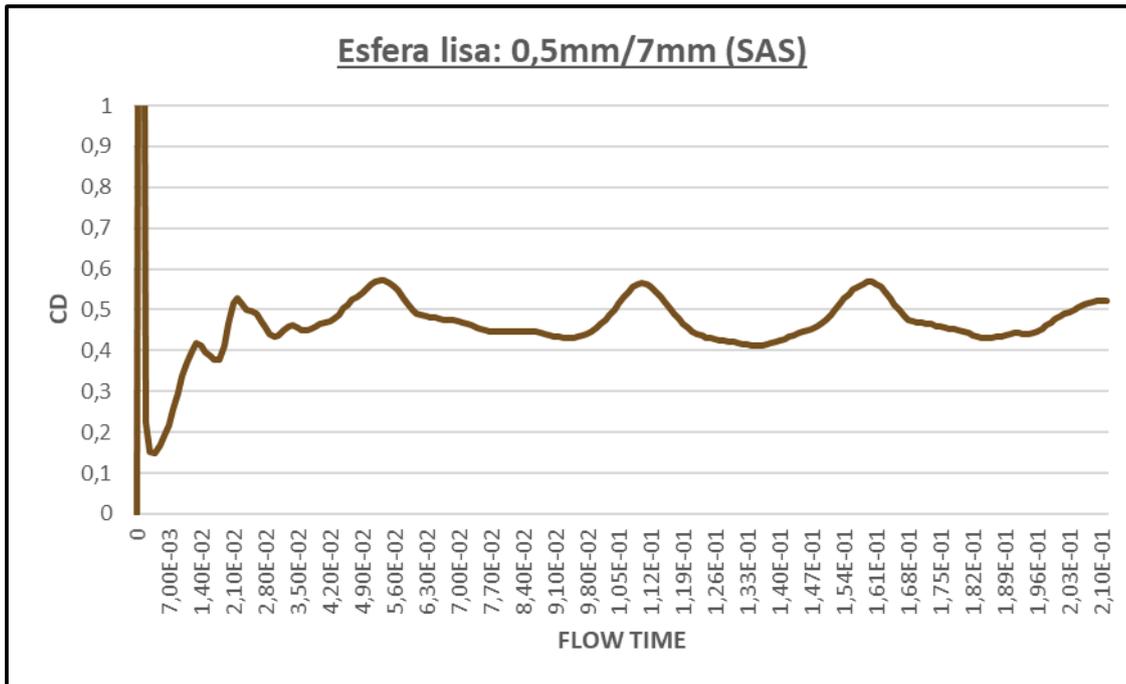


Figura 4.13. C_D de la esfera lisa. 7ª simulación

4.3.4 Resultados

En la Tabla 3.6, se muestran los resultados de los coeficientes de resistencia y de sustentación de todas las simulaciones realizadas en la esfera lisa.

Tabla 3.6. Resultados de las simulaciones con la esfera lisa.

Malla	Modelo	Régimen	Velocidad (m/s)	Cd	Cl
3mm/10mm	SST k-omega	Estacionario	30	3,36E-01	
3mm/7mm	SST k-omega	Estacionario	30	3,28E-01	
2mm/10mm	SST k-omega	Estacionario	30	3,27E-01	
3mm/10mm	SAS	Transitorio	30	3,20E-01	-3,83E-03
1mm/10mm	SAS	Transitorio	30	3,49E-01	-6,88E-03
0,5mm/7mm	SAS	Transitorio	30	3,87E-01	-3,02E-02
0,25mm/5mm	SAS	Transitorio	30	3,71E-01	-8,77E-02
0,5mm/7mm	SAS	Transitorio	20	4,01E-01	2,08E-02
0,5mm/7mm	SAS	Transitorio	10	4,72E-01	-6,52E-02

Durante algunas simulaciones se calculó también el C_L para comprobar que fuera nulo por ser una figura simétrica y con ángulo de ataque cero. El promedio no es exactamente cero, pero observamos valores muy pequeños.

Las Figuras 4.14 a 4.19 muestran los mapas de velocidad y de presión obtenidos a distintas velocidades.

- **Mapas de velocidad y presión 30 m/s**

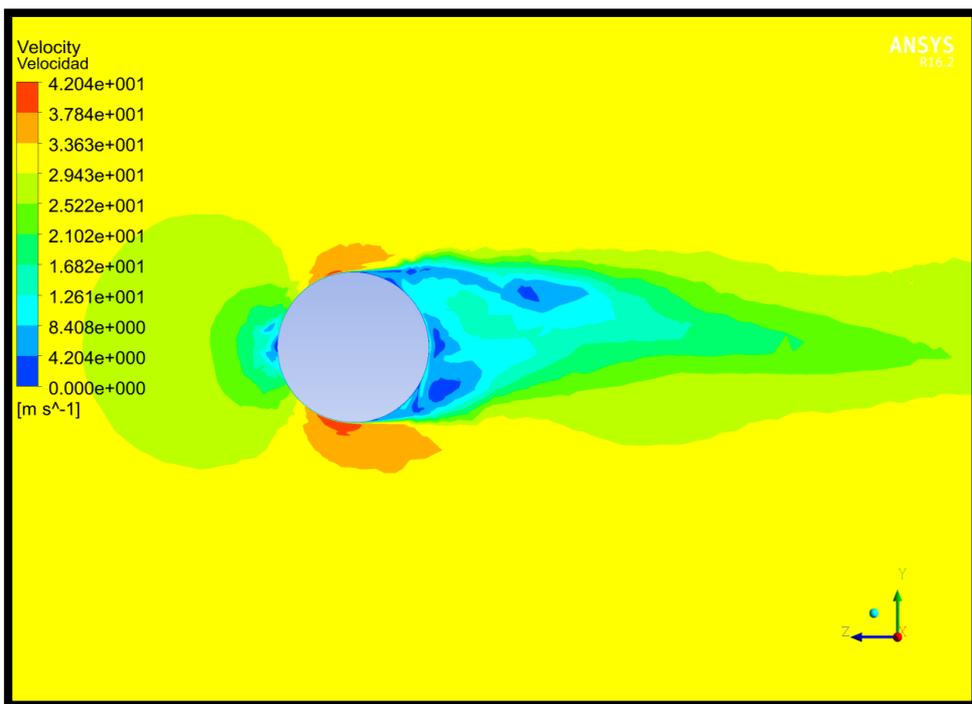


Figura 4.14. Mapa de velocidades de la esfera lisa con 30 m/s.

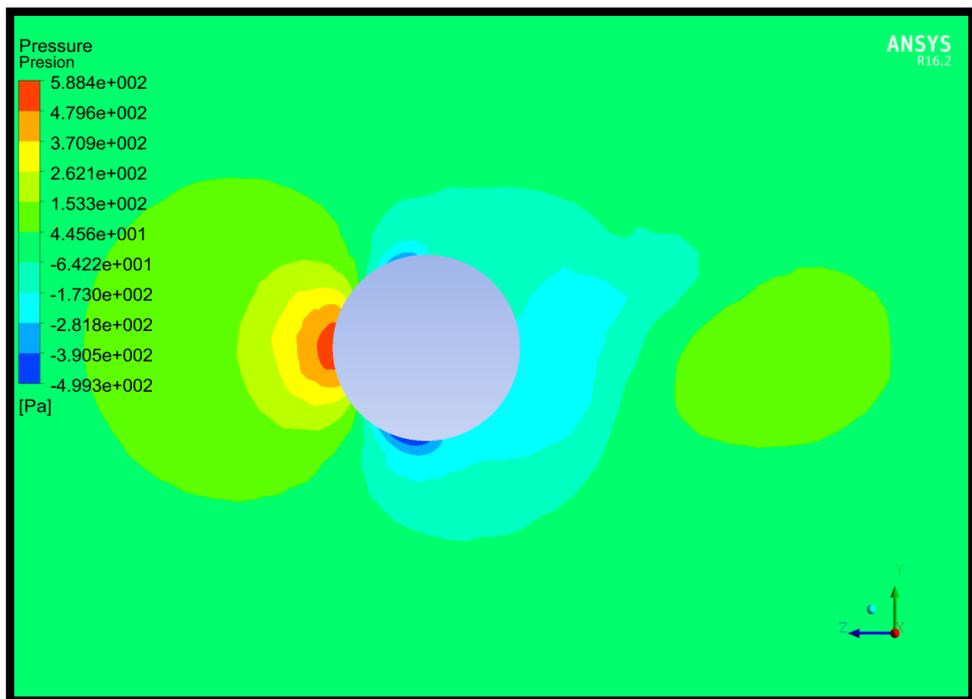


Figura 4.15. Mapa de presiones de la esfera lisa con 30 m/s.

- **Mapas de velocidad y presión 20 m/s**

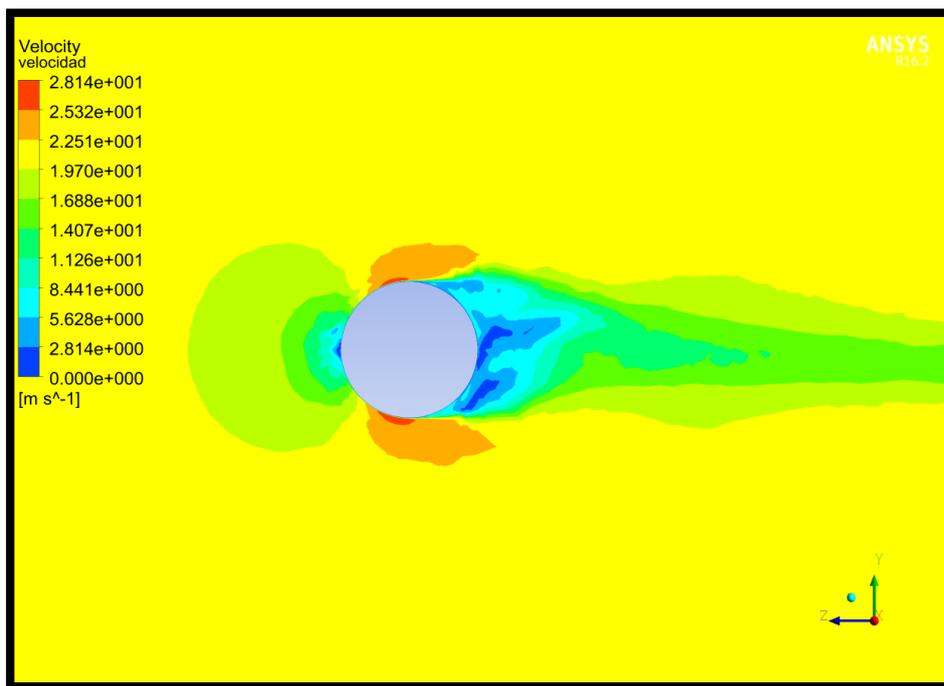


Figura 4.16. Mapa de velocidades de la esfera lisa a 20 m/s

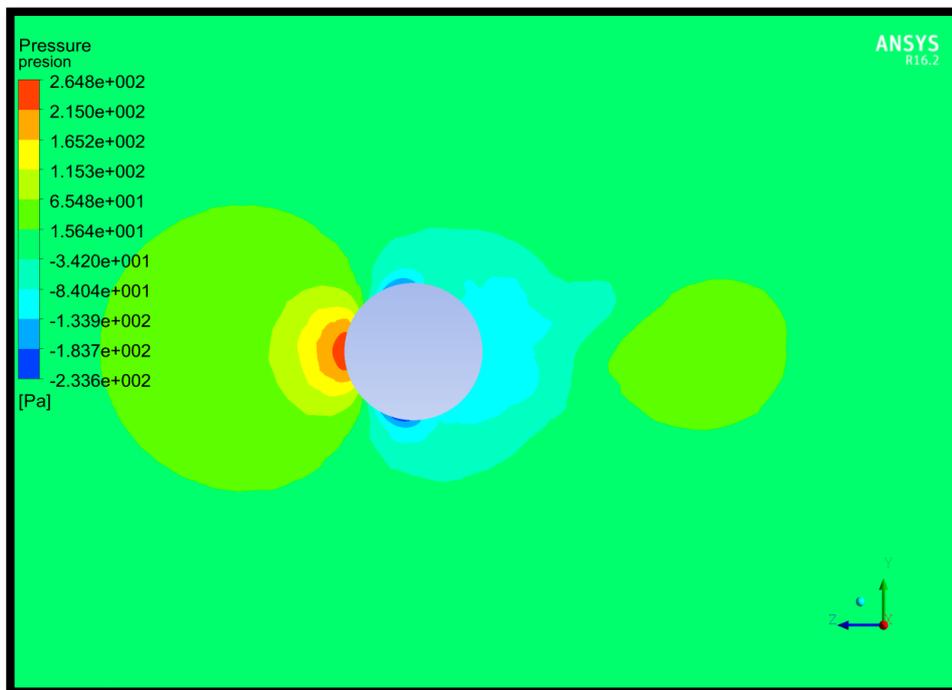


Figura 4.17. Mapa de presiones de la esfera lisa a 20 m/s

- **Mapas de velocidad y presión 10 m/s**

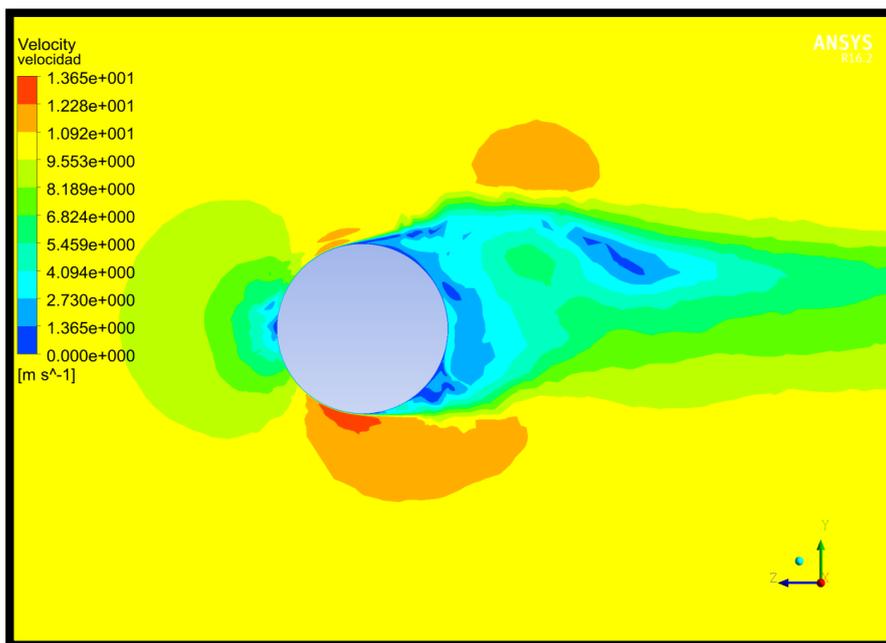


Figura 4.18. Mapa de velocidades de la esfera lisa a 10 m/s

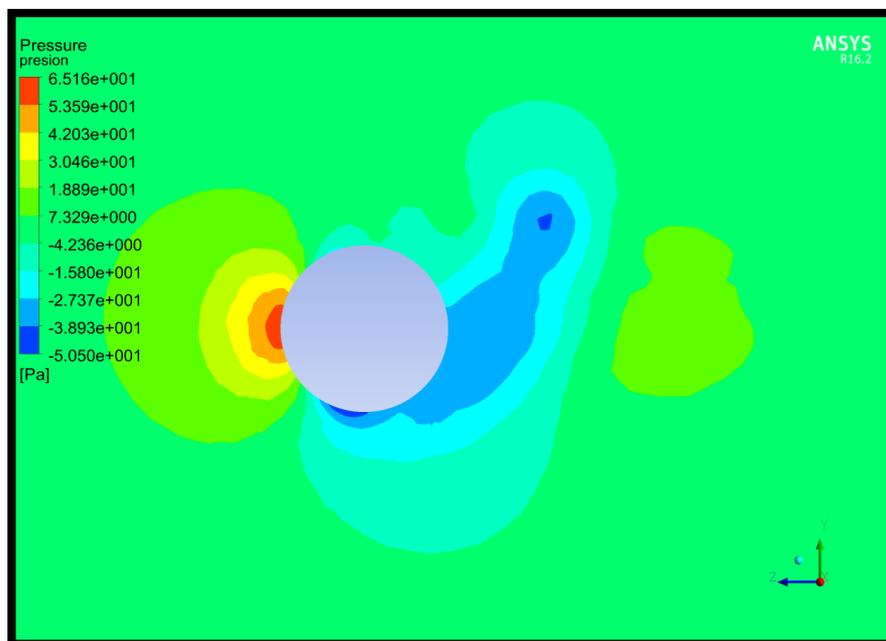


Figura 4.19. Mapa de presiones de la esfera lisa a 10 m/s

En los mapas de velocidad vemos como el aire entra a la velocidad inicial establecida y su velocidad se reduce a medida que se acerca a la esfera. En el punto medio de la zona frontal ocurre la separación del flujo de aire y se produce el pico máximo de presión y el mínimo de velocidad (punto de estancamiento). Si comparamos el mapa de presiones con el de velocidades, se ve claramente que donde la presión es muy alta, la velocidad es muy baja y viceversa. Por lo tanto, queda demostrado el Principio de Bernoulli.

En la Figura 4.20 se observa con mayor claridad la superficie del modelo y muestra como la velocidad del aire es nula en la superficie, pero va aumentando a medida que se aleja de ésta. Estamos viendo la capa límite, que como ya se comentó en la teoría, en esta zona no se cumple el Principio de Bernoulli debido a las fuerzas viscosas.

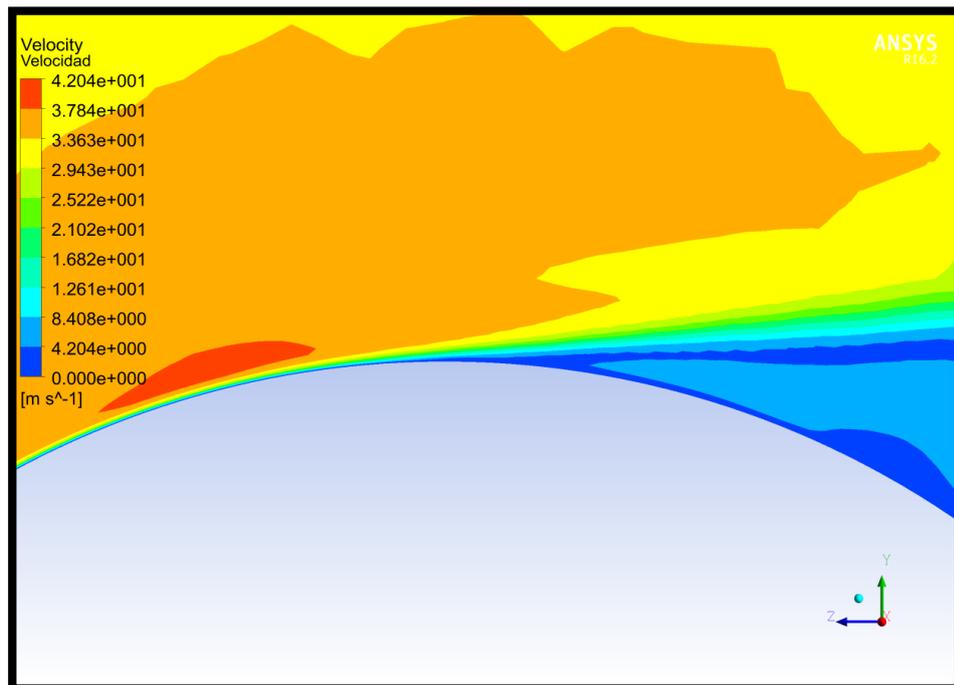


Figura 4.20. Vista en detalle de las velocidades en la capa límite.

Por otro lado, podemos alcanzar a ver que el punto en el cual la capa límite se desprende de la esfera, se produce aproximadamente en el centro de ésta. Este hecho genera una estela con una amplia zona turbulenta. En esta franja, la presión disminuye al igual que la velocidad y podemos distinguir una zona con alta vorticidad y rotacionalidad, tal como muestran los mapas de vectores de las Figuras 4.21, 4.22, 4.23.

Recordemos que estamos en régimen laminar y, por lo tanto, la estela que obtenemos de la simulación se corresponde con la que nos muestra la teoría en las Figuras 2.17 y 2.12 a).

A medida que la corriente del flujo se reestablece y pasa la zona de turbulencias, la velocidad y la presión vuelven poco a poco a sus valores iniciales.

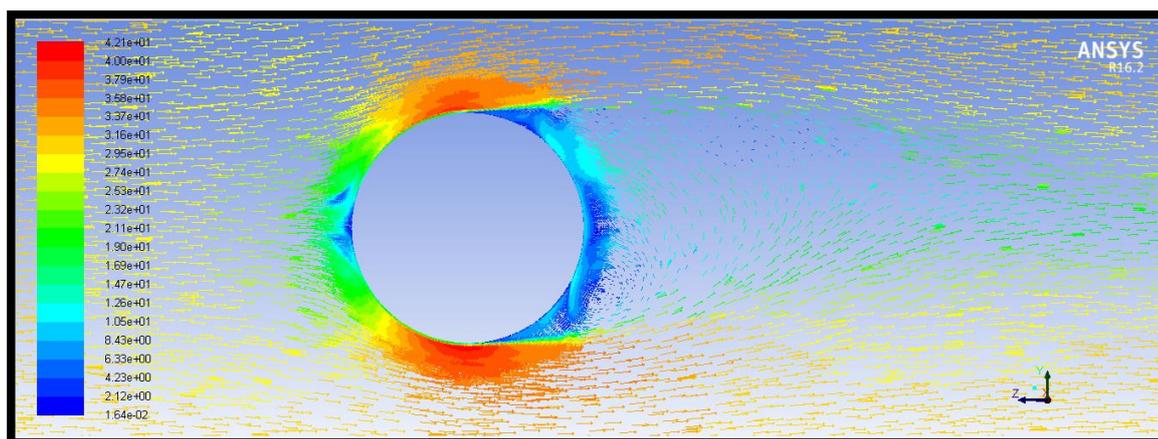


Figura 4.21. Mapa de vectores de la esfera lisa a 30 m/s.

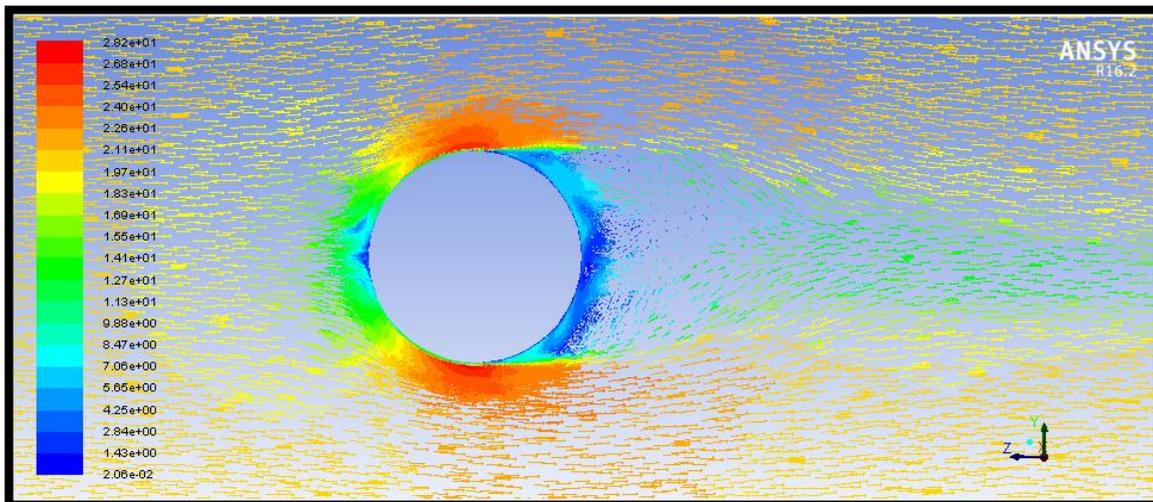


Figura 4.22. Mapa de vectores de la esfera lisa a 20 m/s.

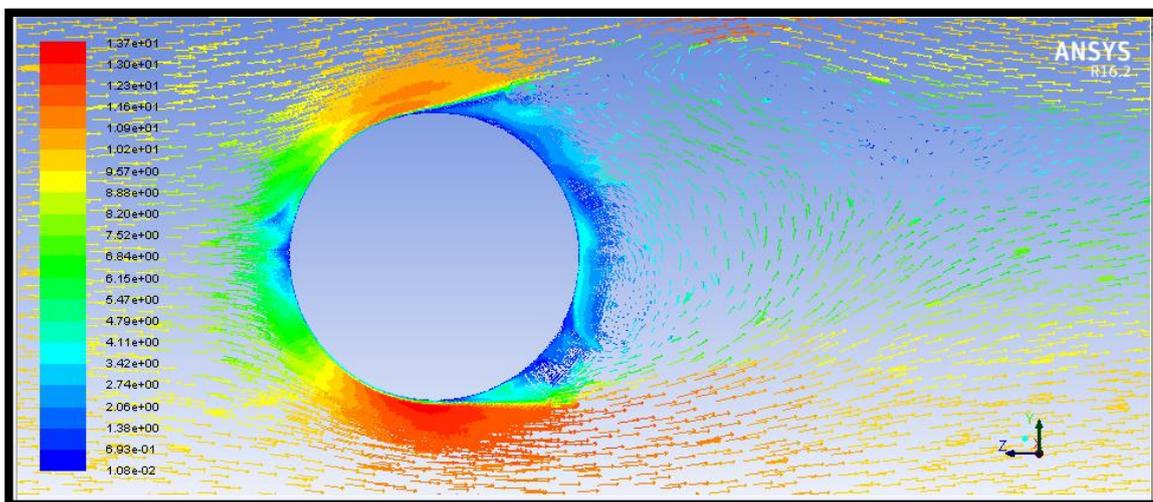


Figura 4.23. Mapa de vectores de la esfera lisa a 10 m/s.

- **Perfiles de velocidad**

Los perfiles de velocidad muestran la distribución de velocidad en un área transversal normal a la dirección de flujo. En las Figuras 4.24, 4.25, 4.26 se muestran los perfiles de velocidad aguas arriba y aguas abajo obtenidos para diferentes velocidades.

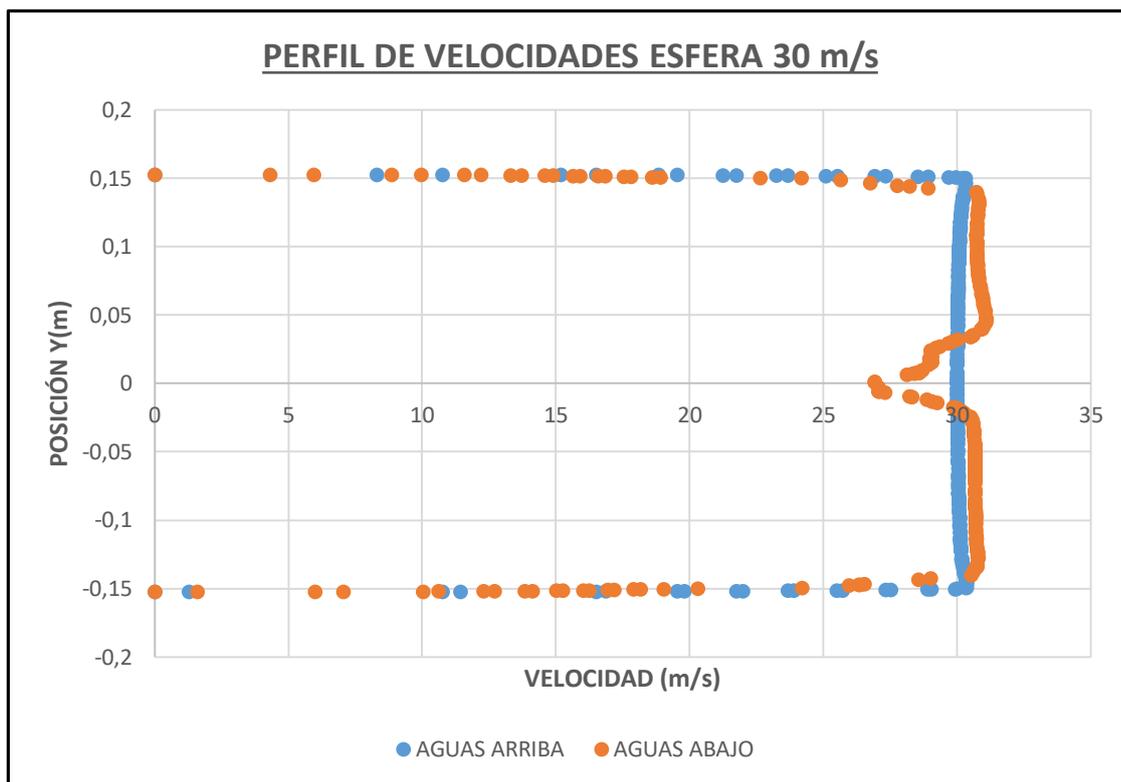


Figura 4.24. Perfil de velocidades de la esfera lisa a 30 m/s.

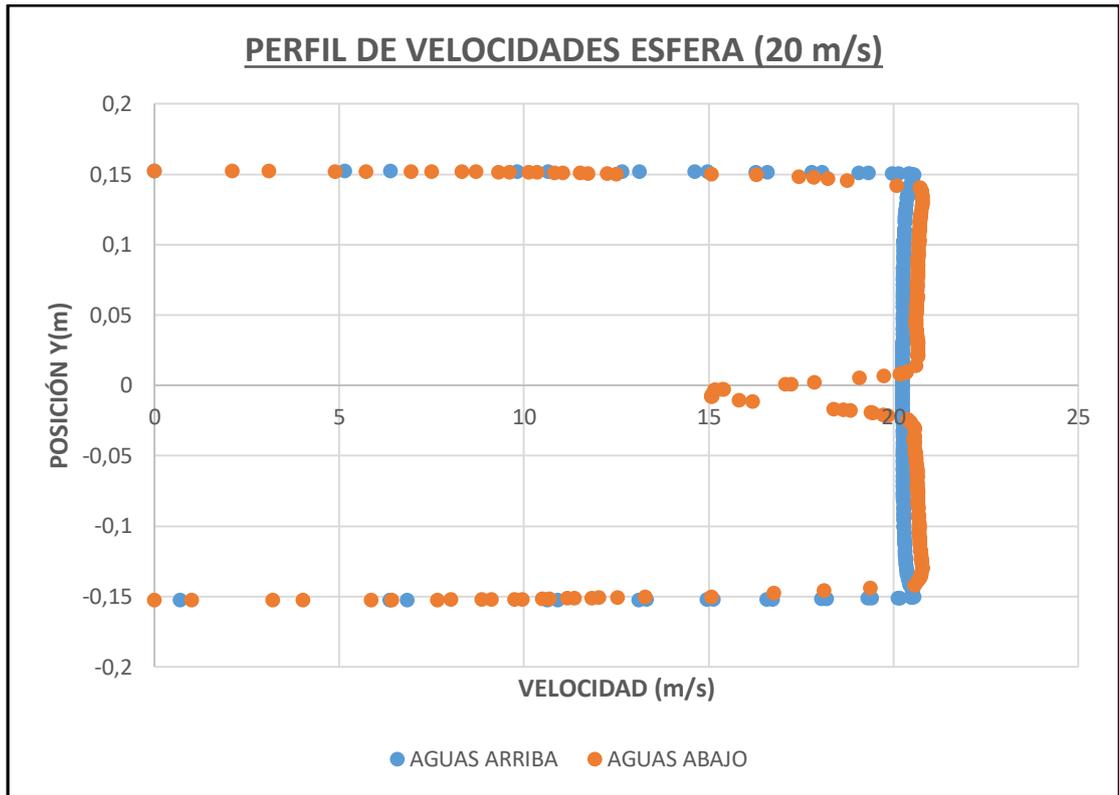


Figura 4.25. Perfil de velocidades de la esfera lisa a 20 m/s.

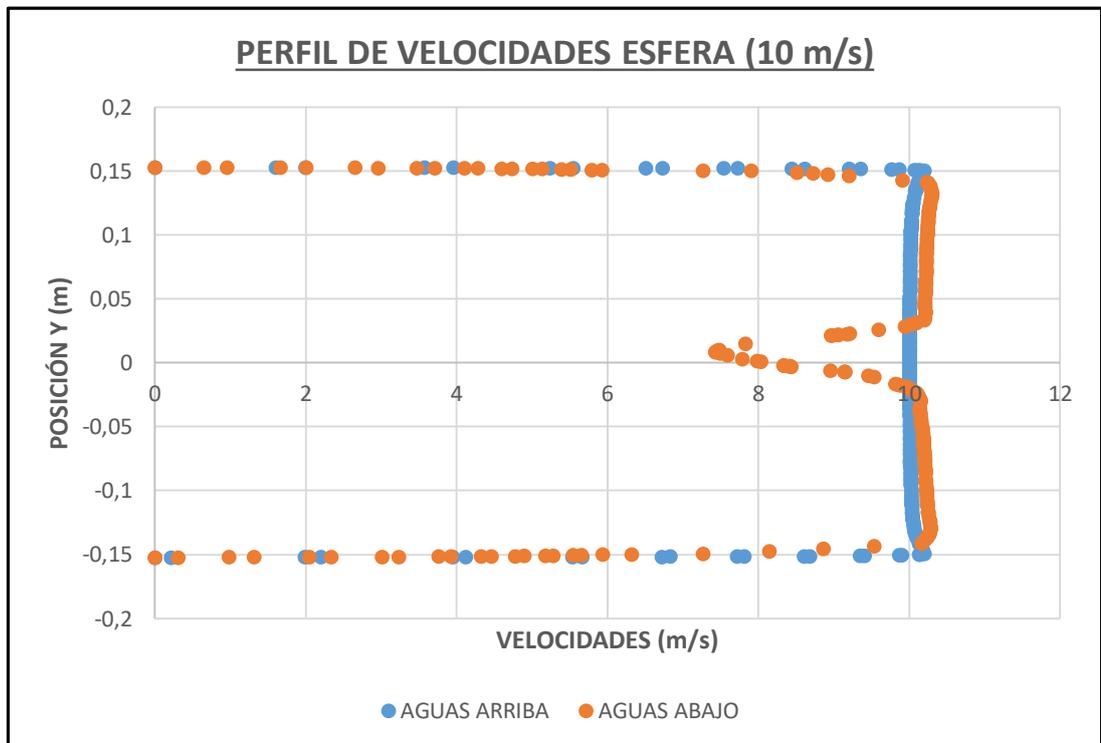


Figura 4.26. Perfil de velocidades de la esfera lisa a 10 m/s.

Podemos observar como las tres Figuras 4.24, 4.25 y 4.26 tienen una forma muy parecida. Las partículas de aire tienen velocidad nula justo en la superficie de las paredes de la cámara por la teoría de no deslizamiento y cuando se alejan de la pared van aumentando su velocidad. Al contrario que con los perfiles experimentales no se percibe en las gráficas un aumento de velocidad tan progresivo aguas arriba, sino que las moléculas alcanzan la velocidad inicial de entrada más cerca de la pared. Más concretamente lo hace a 2,5 mm de la pared aguas arriba y 12,5 mm de la pared aguas abajo, a diferencia de los 20 mm que veíamos en la Figura 2.18.

En las paredes de la cámara vemos que el aire se comporta como un flujo paralelo sobre placa plana, dejando un perfil de velocidades como el que observamos en la Figura 2.18.

Hay algo que tienen en común todos los perfiles de velocidad aguas abajo. Cuando nos acercamos a la altura de la esfera se registra una disminución de la velocidad que alcanza un mínimo justo en la mitad de la cámara, o sea, en la mitad de la esfera. Esto se debe a la estela que se forma detrás de la esfera. Si nos fijamos en la Figura 4.27, vemos la larga estela que se forma llegando hasta el final de la cámara.

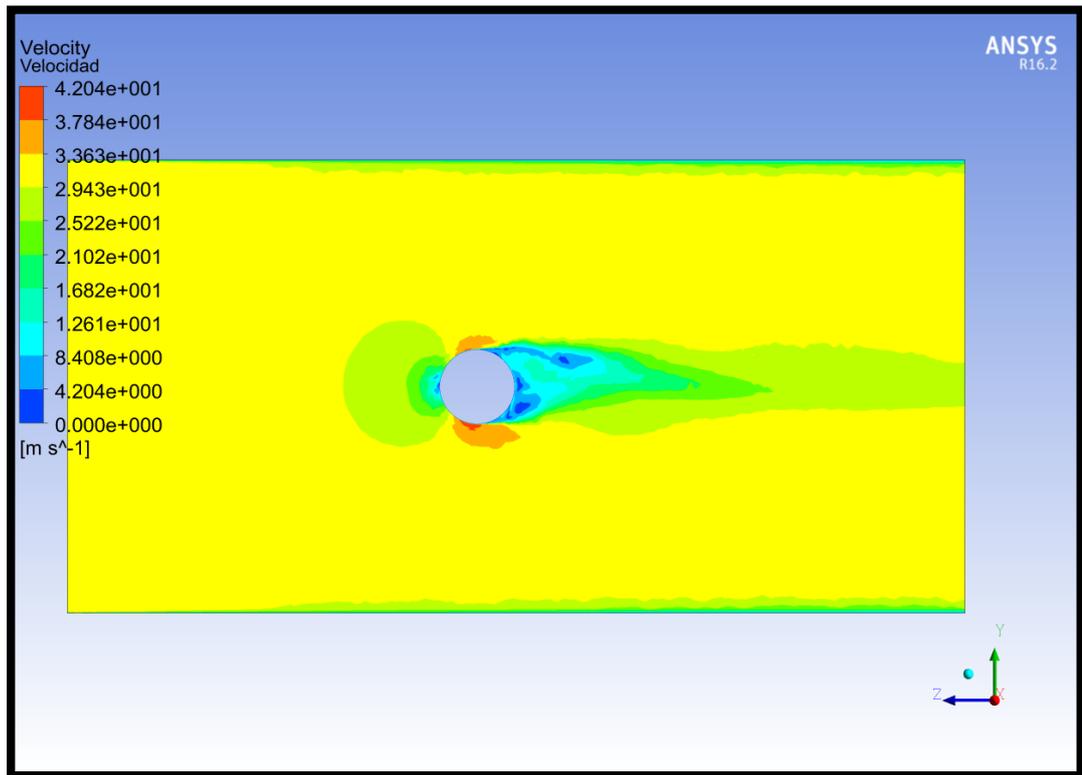


Figura 4.27. Vista alejada del mapa de velocidades de la esfera lisa a 30 m/s.

4.4 Media esfera

4.4.1 Modelado

Al igual que con la esfera lisa, el modelo se ha realizado en SolidWorks para posteriormente ser importando en ANSYS y realizar las operaciones pertinentes antes de crear la malla (Figuras 4.28 y 4.29).

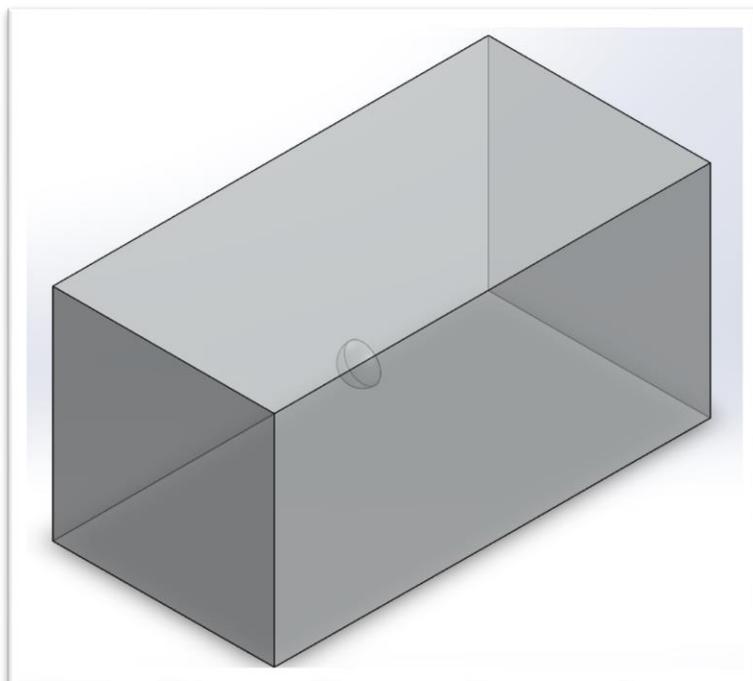


Figura 4.28. 3D Vista isométrica de la media esfera.

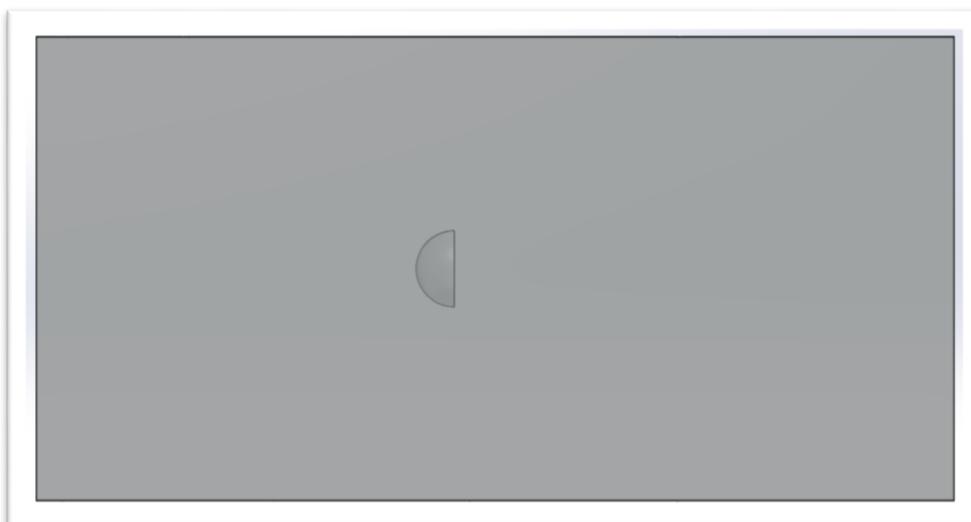


Figura 4.29. 3D vista lateral de la media esfera.

4.4.2 Mallado

Para el mallado de la media esfera seguiremos el mismo procedimiento que seguimos en la esfera lisa. Empezaremos creando una capa límite para las paredes de la media esfera y la cámara (Figuras 4.30 y 4.31). Después crearemos una malla para la geometría y otra para la cámara de 3mm y 10mm respectivamente. De la misma manera empezaremos las simulaciones con esta malla y la iremos modificando en función de los resultados obtenidos.

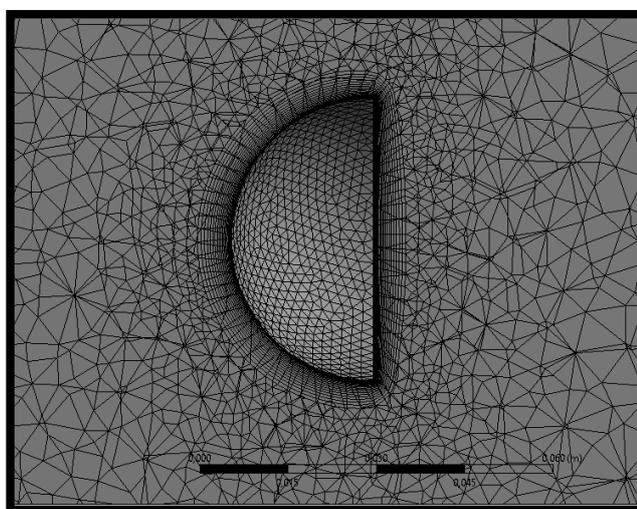


Figura 4.30. Malla en la media esfera y alrededores.

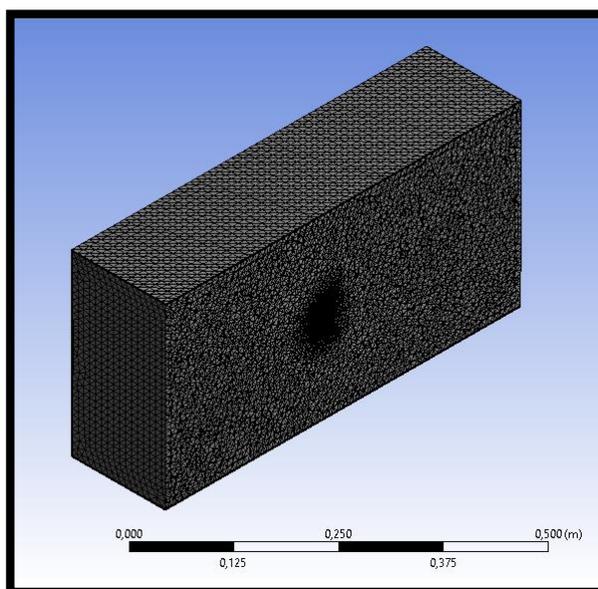


Figura 4.31. Mallado total de la media esfera.

4.4.3 Ajuste de parámetros y configuraciones de malla

♣ 1ª simulación

- Malla: 3mm/10mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Estacionario
- Modelo de turbulencia: SST k- ω .
- $C_D = 4,41$ e-01

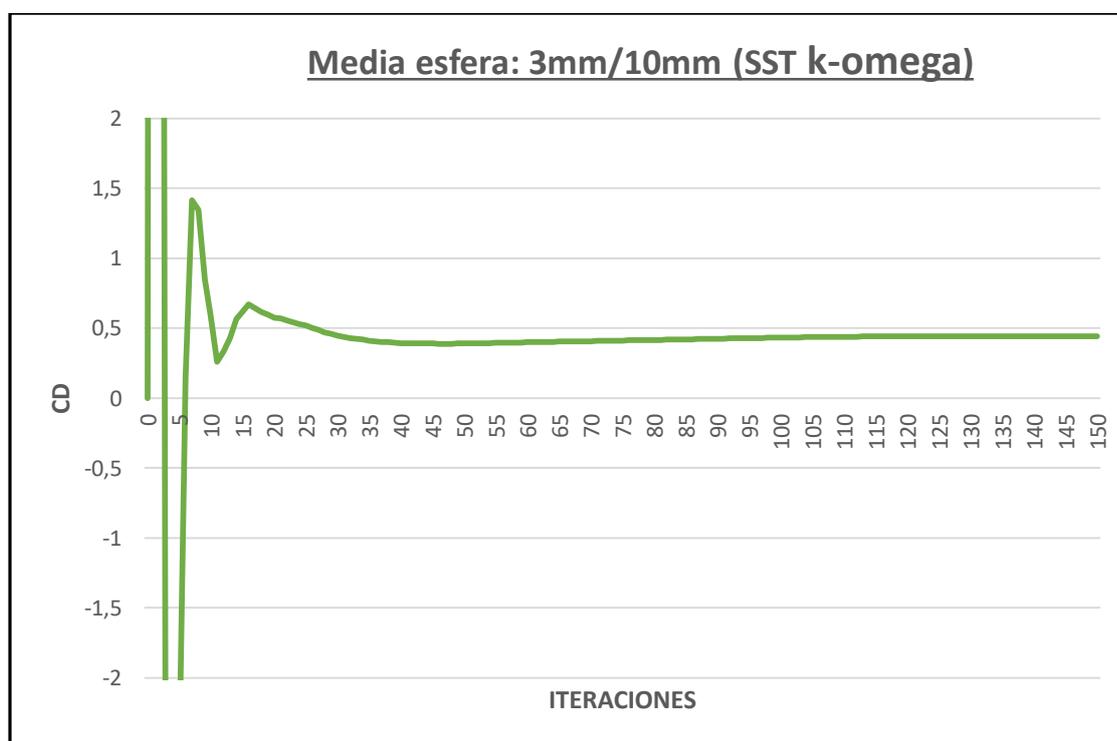


Figura 4.32. C_D de la media esfera. 1ª simulación.

En la primera simulación obtenemos un valor próximo al experimental, algo que no pasaba con la esfera lisa. Continuamos probando con una malla más fina para ver los cambios que se producen.

♣ 2ª simulación

- Malla: 3mm/7mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Estacionario
- Modelo de turbulencia: SST k- ω .
- $C_D = 4,33 \text{ e-}01$

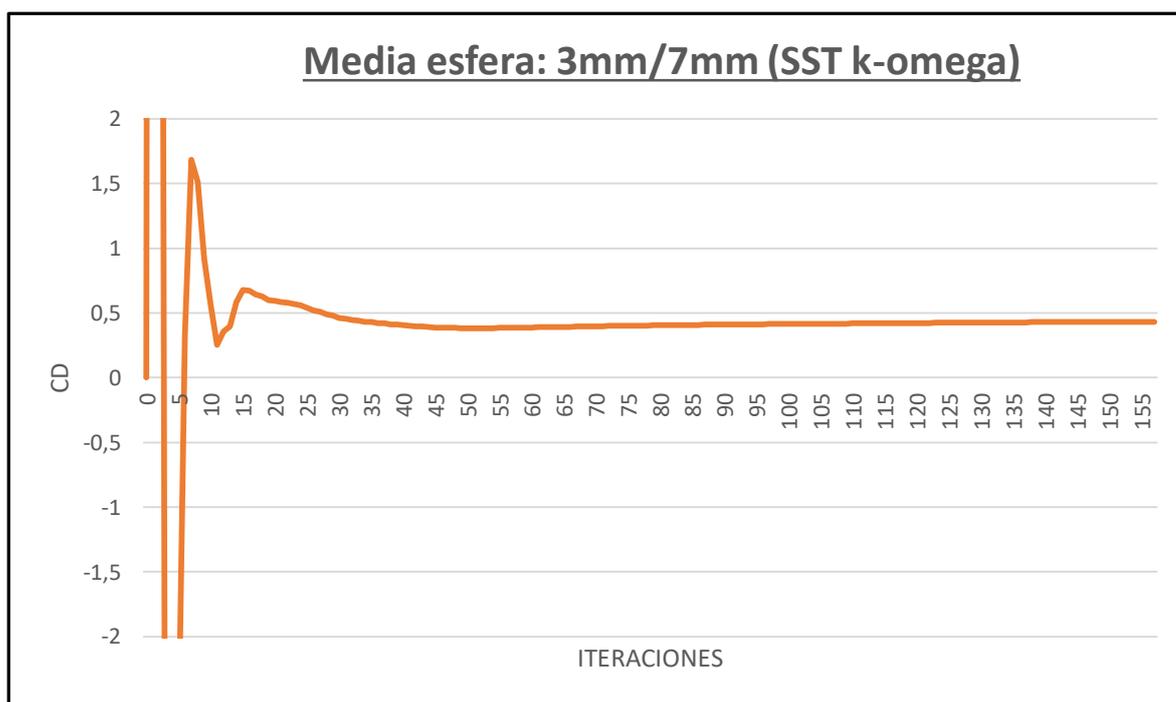


Figura 4.33. C_D de la media esfera. 2ª simulación.

Modificando la malla de la cámara se obtiene un C_D muy parecido. Por esta razón se decide utilizar una malla de 10mm para la cámara. Solo falta escoger la malla de la media esfera.

♣ 3ª simulación

- Malla: 2mm/10mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Estacionario
- Modelo de turbulencia: SST k- ω .
- $C_D = 4,07$ e-01

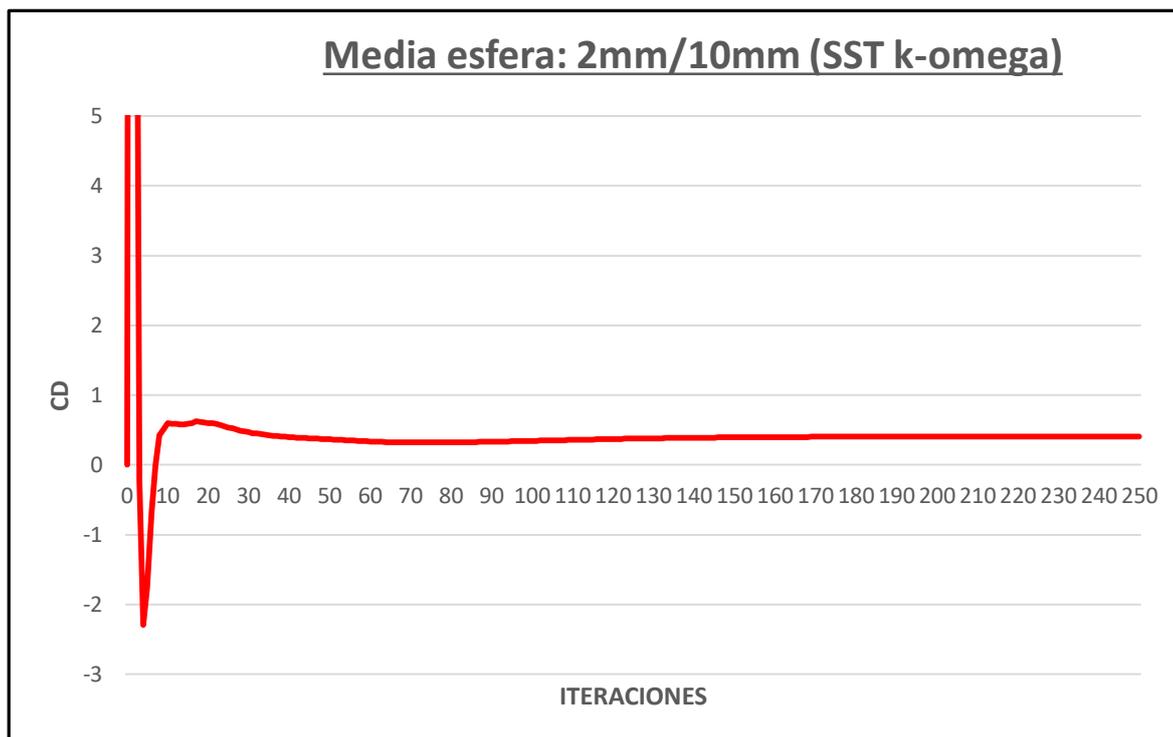


Figura 4.34. C_D de la media esfera. 3ª simulación

Dado que el C_D ha disminuido con 2mm alrededor de la media esfera probamos con una malla de 1mm.

♠ 4ª simulación

- Malla: 1mm/10mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Estacionario.
- Modelo de turbulencia: SST k- ω .
- $C_D = 4,02 \text{ e-}01$

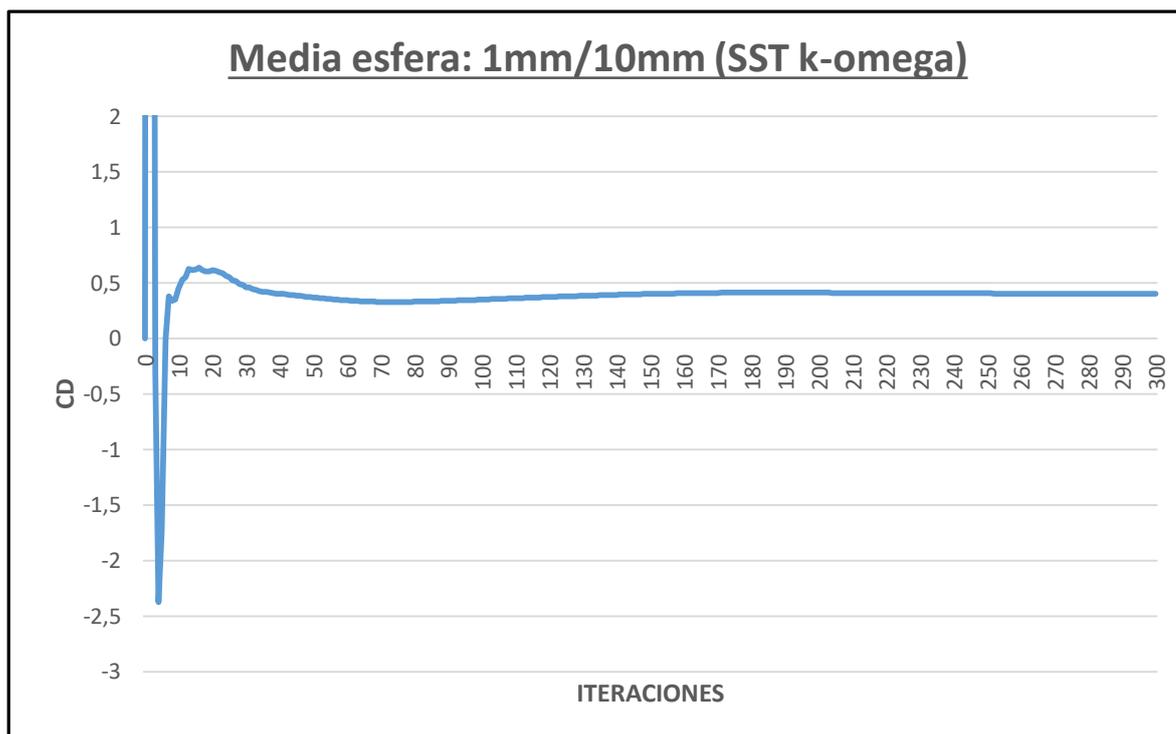


Figura 4.35. C_D de la media esfera. 4ª simulación.

Los cambios ahora son despreciables, el C_D converge prácticamente al mismo valor, por lo tanto, seleccionamos una malla definitiva de 2mm/10mm. Por último, realizamos las simulaciones en estado transitorio.

Es interesante comentar que todos los valores de C_L obtenidos hasta el momento tienden a 0 como muestra la Figura 4.36. Es una buena señal, puesto que por simetría las fuerzas de sustentación se han de cancelar.

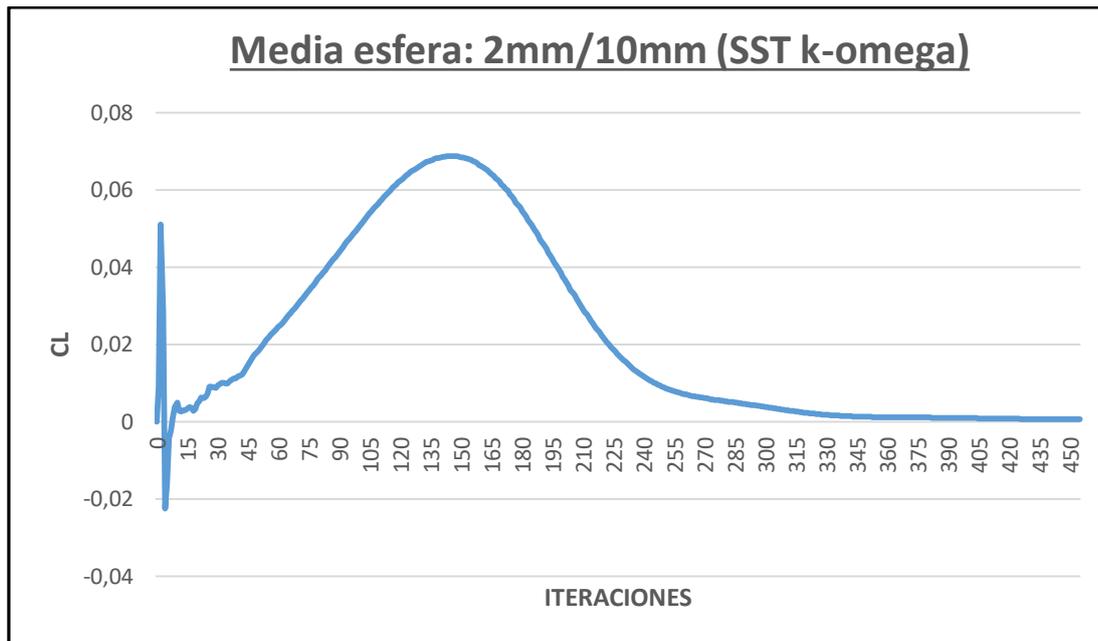


Figura 4.36. Cl de la media esfera. 4ª simulación

▲ 5ª simulación

- Malla: 2mm/10mm.
- Velocidad $c_0 = 30$ m/s.
- Régimen: Transitorio
- Modelo de turbulencia: SAS.
- C_D promedio = $3,84 \cdot 10^{-1}$

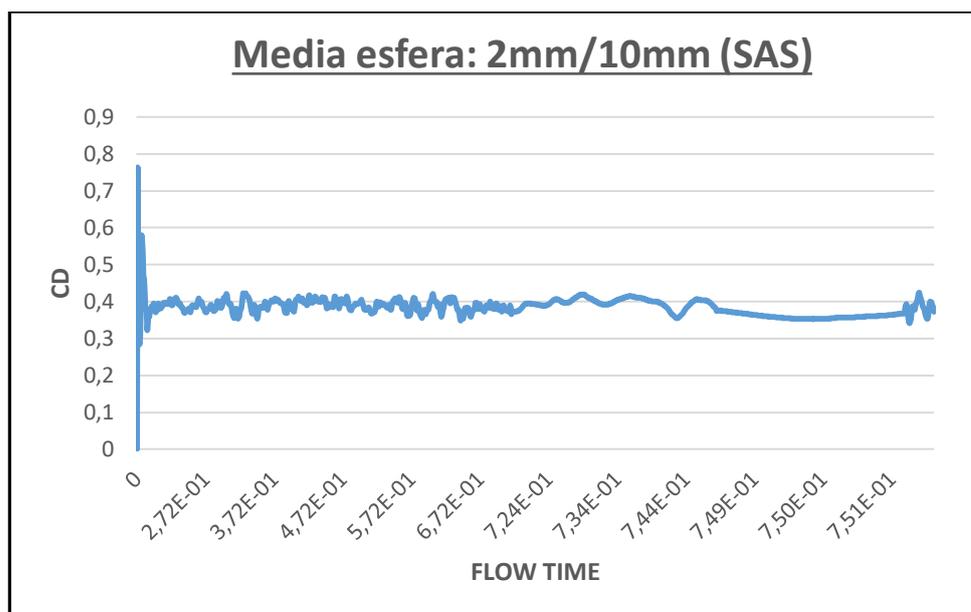


Figura 4.37. CD de la media esfera. 5ª simulación

Finalmente obtuvimos un C_D promedio de $3,84e-01$ para una velocidad de 30 m/s. Los datos experimentales mostraban un valor de C_D de 0,49. Si nos damos cuenta, los datos experimentales de la media esfera y la esfera lisa son prácticamente iguales. Si comparamos los datos obtenidos en CFD pasa exactamente lo mismo. Próximamente en los resultados se comentarán las razones de porqué esto sucede.

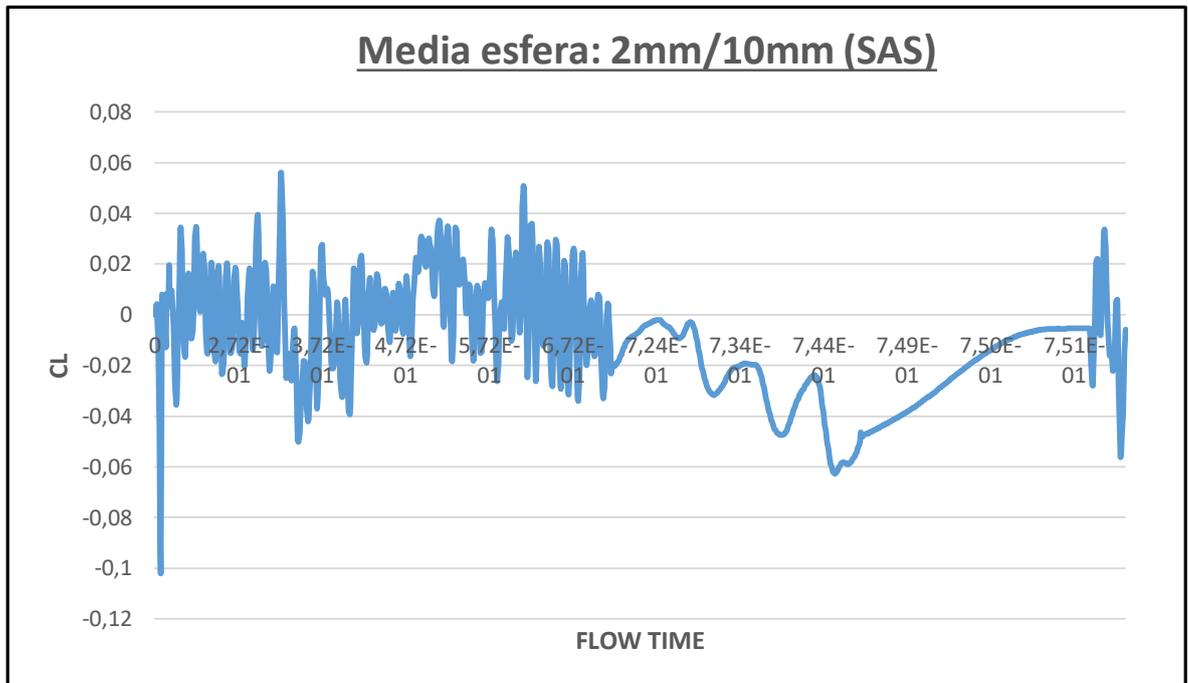


Figura 4.38. C_L de la media esfera. 5ª simulación.

Con respecto al C_L los datos oscilan claramente en 0, algo que no sucedía con las simulaciones de la esfera lisa.

Para finalizar realizamos dos últimas simulaciones para una velocidad de 20 m/s y 10 m/s.

▲ 6ª simulación

- Malla: 2mm/10mm.
- Velocidad $c_0 = 20$ m/s.
- Régimen: Transitorio
- Modelo de turbulencia: SAS.
- C_D promedio= 4,19 e-01

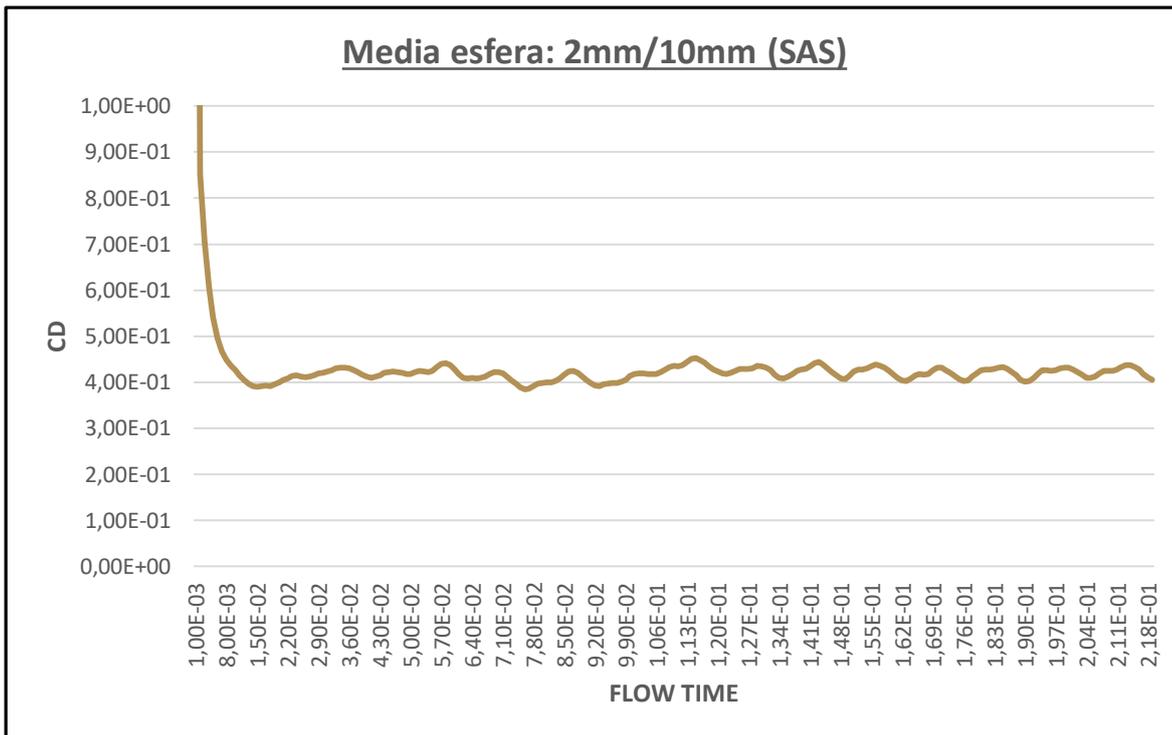


Figura 4.39. C_D de la media esfera. 6ª simulación

♣ 7ª simulación

- Malla: 2mm/10mm.
- Velocidad $c_0 = 10$ m/s.
- Régimen: Transitorio
- Modelo de turbulencia: SAS.
- C_D promedio= 4,48 e-01

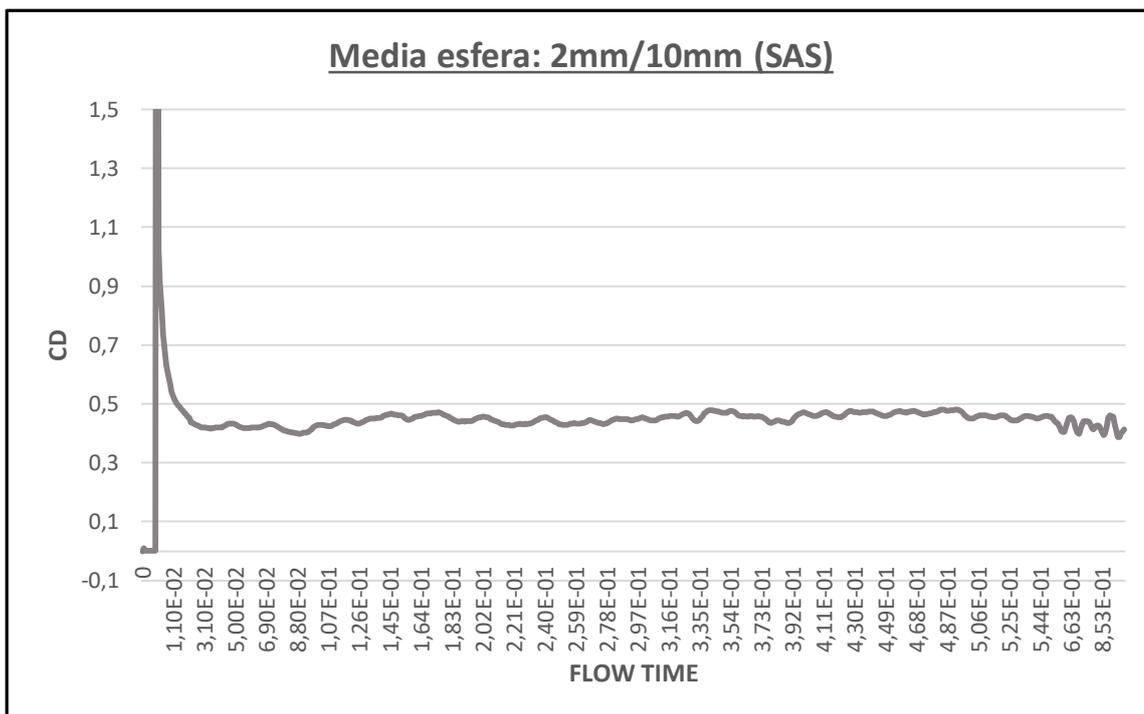


Figura 4.40. C_D de la media esfera. 7ª simulación

4.4.4 Resultados

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados obtenidos en la media esfera en las distintas simulaciones.

Tabla 3.7. Resultados de las simulaciones con la media esfera

Malla	Modelo	Régimen	Velocidad (m/s)	C_D	C_L
3mm/10mm	SST k-omega	Estacionario	30	4,41E-01	6,45E-03
3mm/7mm	SST k-omega	Estacionario	30	4,33E-01	7,78E-04
2mm/10mm	SST k-omega	Estacionario	30	4,07E-01	5,80E-04
1mm/10mm	SST k-omega	Estacionario	30	4,02E-01	6,00E-04
2mm/10mm	SAS	Transitorio	30	3,84E-01	-4,88E-03
2mm/10mm	SAS	Transitorio	20	4,19E-01	7,40E-03
2mm/10mm	SAS	Transitorio	10	4,48E-01	4,50E-03

Las Figuras 4.41 a 4.46 muestran los mapas de velocidad y de presión obtenidos en la media esfera a distintas velocidades.

- **Mapas de velocidad y presión 30 m/s**

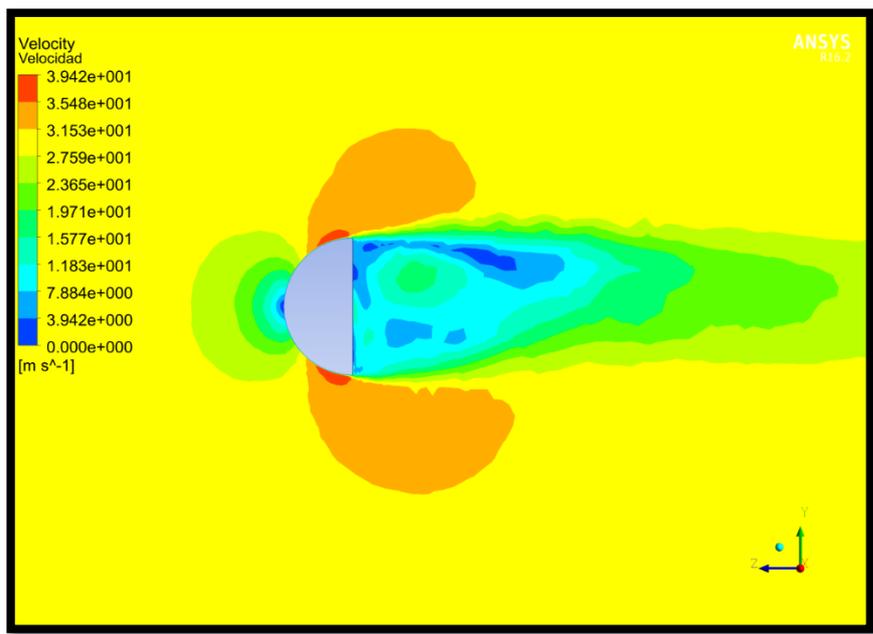


Figura 4.41. Mapa de velocidades de la media esfera a 30 m/s.

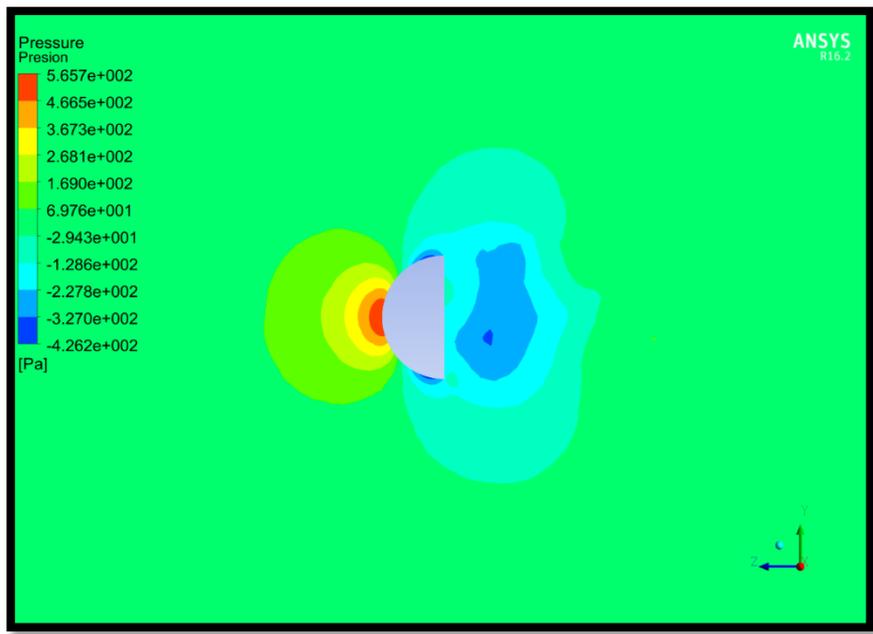


Figura 4.42. Mapa de presiones de la media esfera a 30 m/s.

- **Mapas de velocidad y presión 20 m/s**

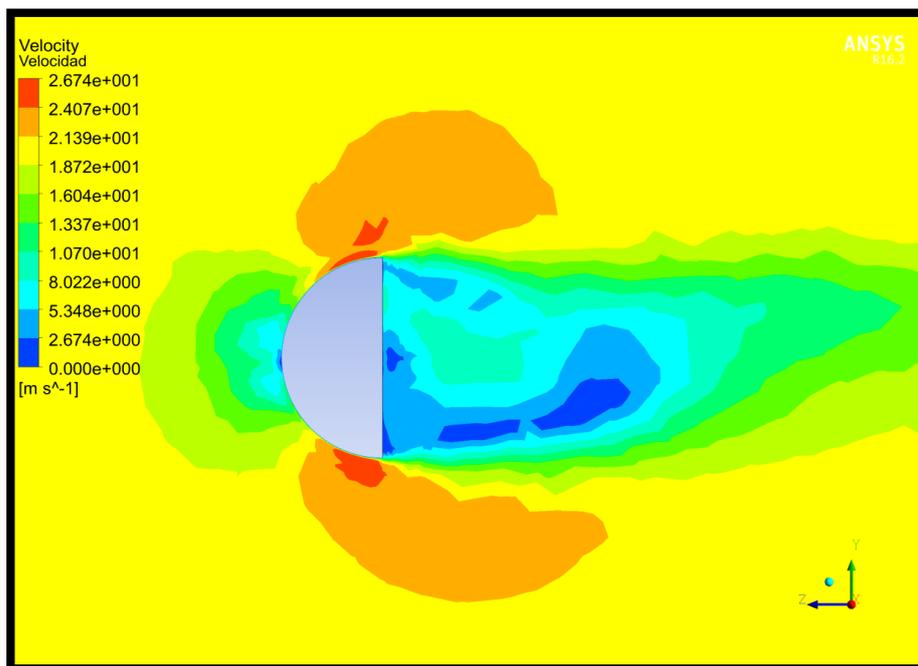


Figura 4.43. Mapa de velocidades de la media esfera a 20 m/s.

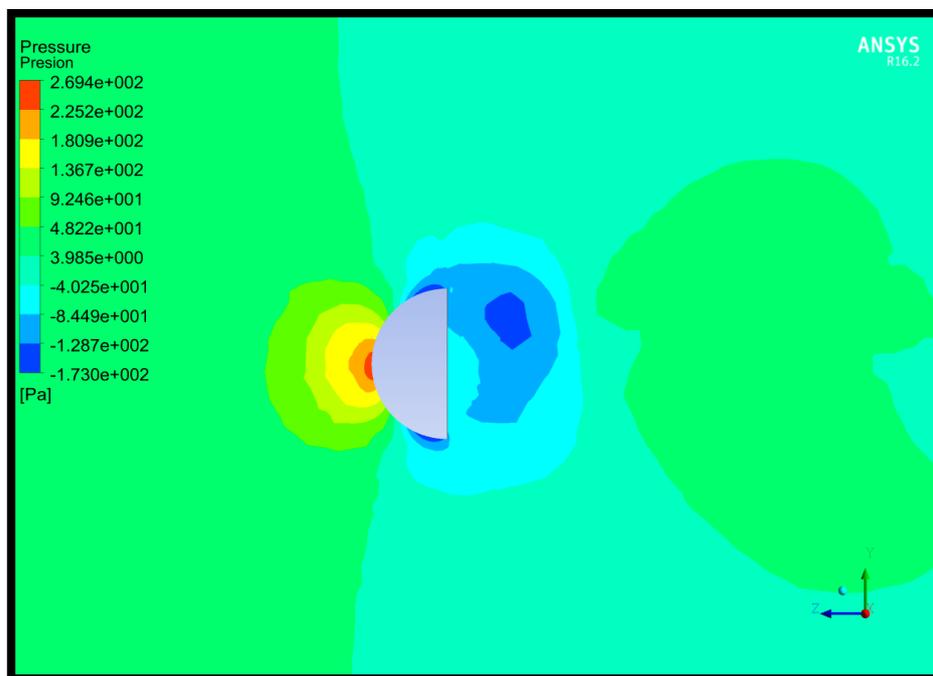


Figura 4.44. Mapa de presiones de la media esfera a 20 m/s

- **Mapas de velocidad y presión 10 m/s**

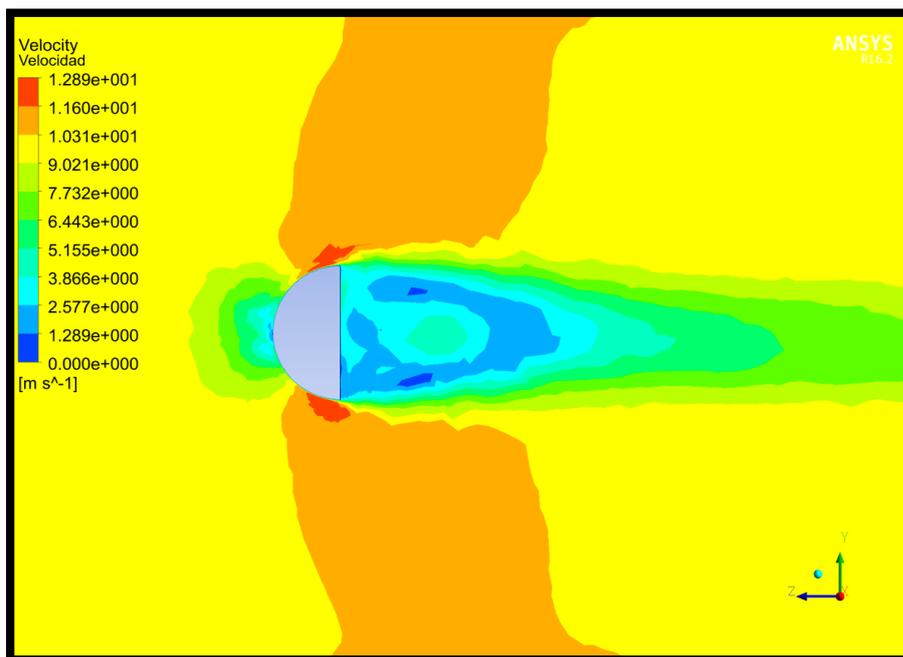


Figura 4.45. Mapa de velocidades de la media esfera a 10 m/s.

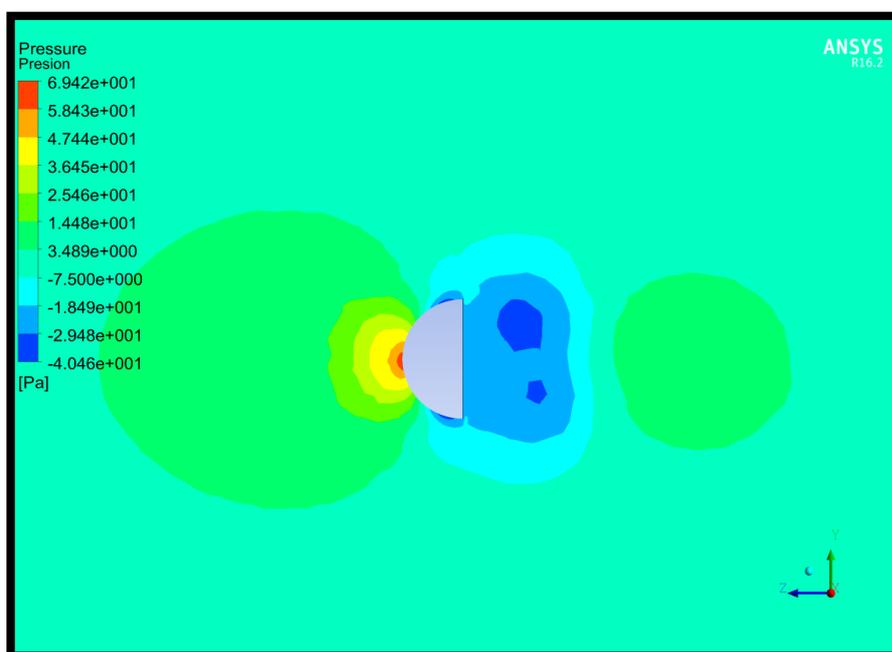


Figura 4.46. Mapa de presiones de la media esfera a 10 m/s.

Podemos confirmar de nuevo que se cumple el Principio de Bernoulli, ya que en los puntos donde la presión es mayor, la velocidad es menor y viceversa.

Observamos unos resultados parecidos entre los diferentes mapas de velocidad y presión para las tres velocidades estudiadas, pero lo más interesante es que se parecen a los mapas obtenidos para la esfera lisa. Continuando con lo que comentábamos en el apartado anterior, existen principalmente dos razones por las cuáles el C_D de la esfera lisa y el de la media esfera salen tan parecidos. La primera, es que el área de la sección transversal de las dos figuras es la misma. Y la segunda es que el desprendimiento de la capa límite se produce aproximadamente en el mismo punto. En el caso de la media esfera está muy claro, el aire se desprende de la superficie cuando ésta ya no existe (Figura 4.47) y se forma la estela que vemos en las imágenes anteriores. En el caso de la esfera lisa se producía en la mitad de la esfera debido a que nos encontramos en régimen laminar.

Teóricamente, una esfera tiene un mejor coeficiente aerodinámico que una media esfera, ya que en ésta última el aire no tiene más remedio que abandonar la superficie justo en la mitad de la sección. De hecho, en los resultados del CFD obtenemos un C_D ligeramente mayor. Recordamos que si estuviéramos en régimen turbulento el aire en la esfera lisa permanecería más tiempo en la superficie y, por lo tanto, seríamos capaces de reducir las fuerzas debido a la presión, al contrario que con la media esfera.

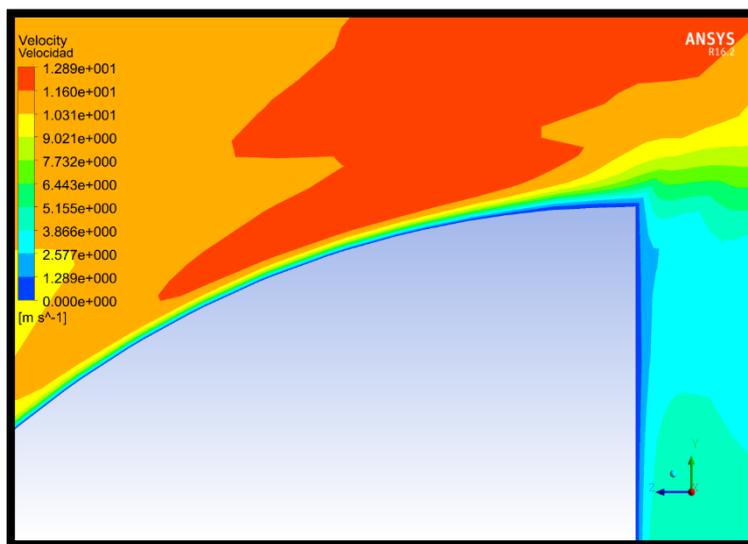


Figura 4.47. Vista en detalle de las velocidades de la media esfera en la capa límite.

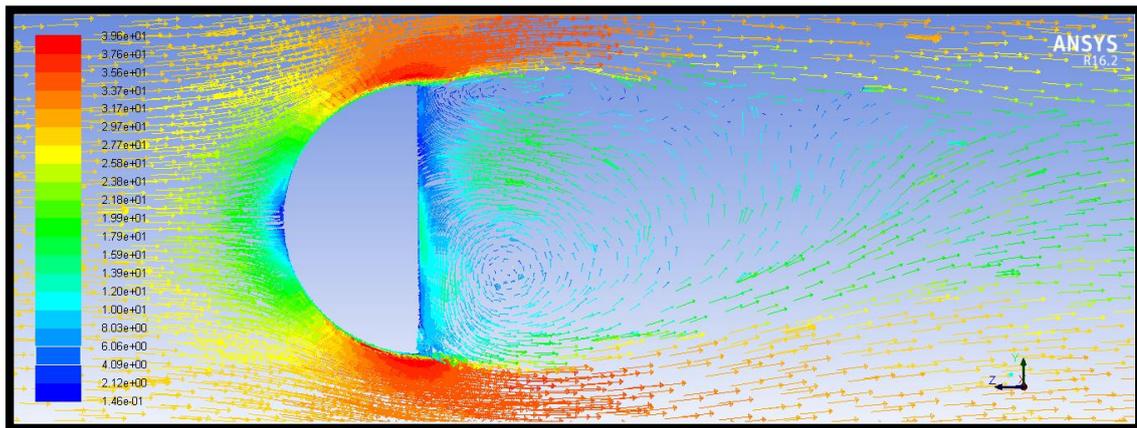


Figura 4.48. Mapa de vectores de la esfera lisa a 30 m/s.

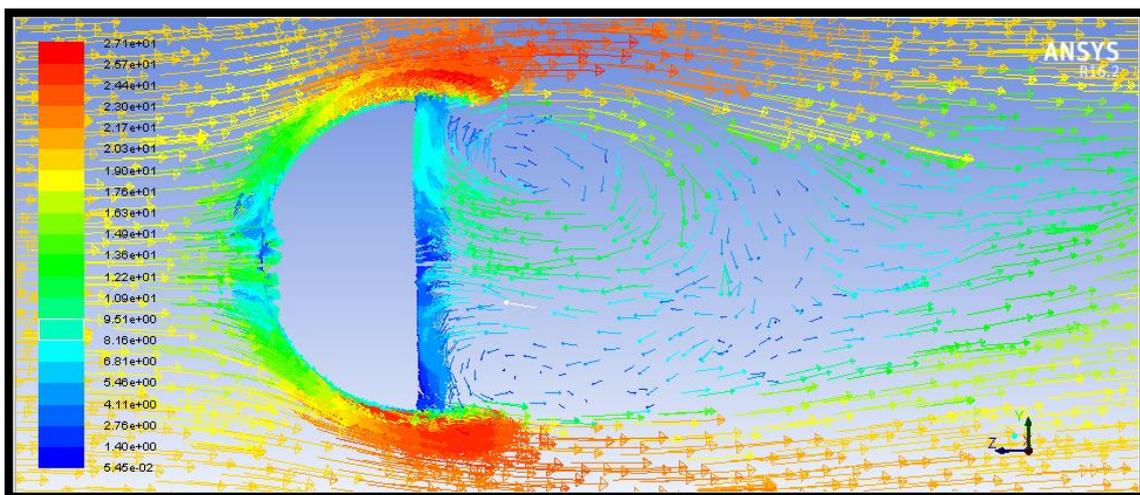


Figura 4.49. Mapa de vectores de la media esfera a 20 m/s.

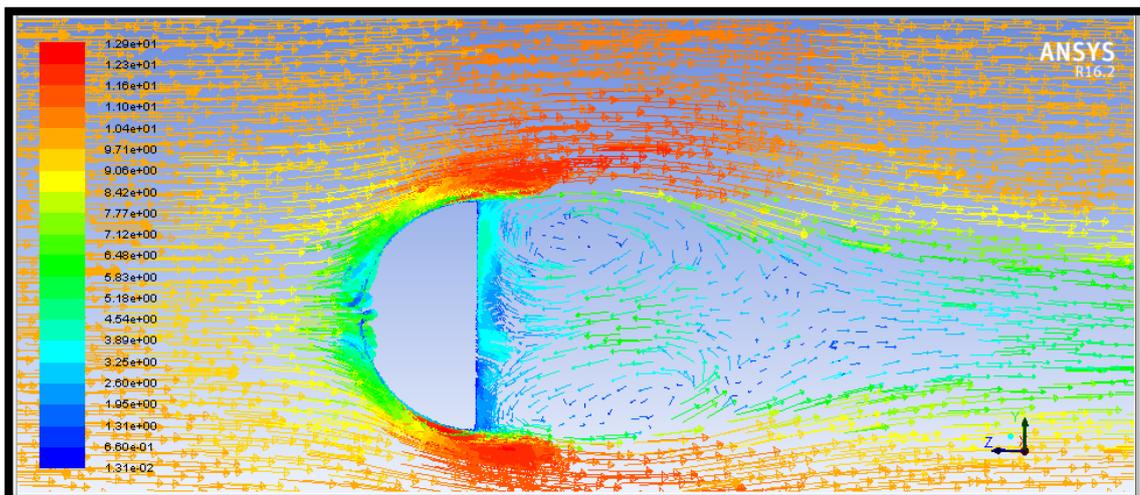


Figura 4.50. Mapa de vectores de la media esfera a 10 m/s.

Como en el caso de la esfera lisa, se genera una zona de alta rotacionalidad y turbulencias en la zona posterior de la media esfera, cuyo comportamiento no se diferencia en función de las velocidades estudiadas (Figuras 4.48, 4.49 y 4.50).

- **Perfiles de velocidad**

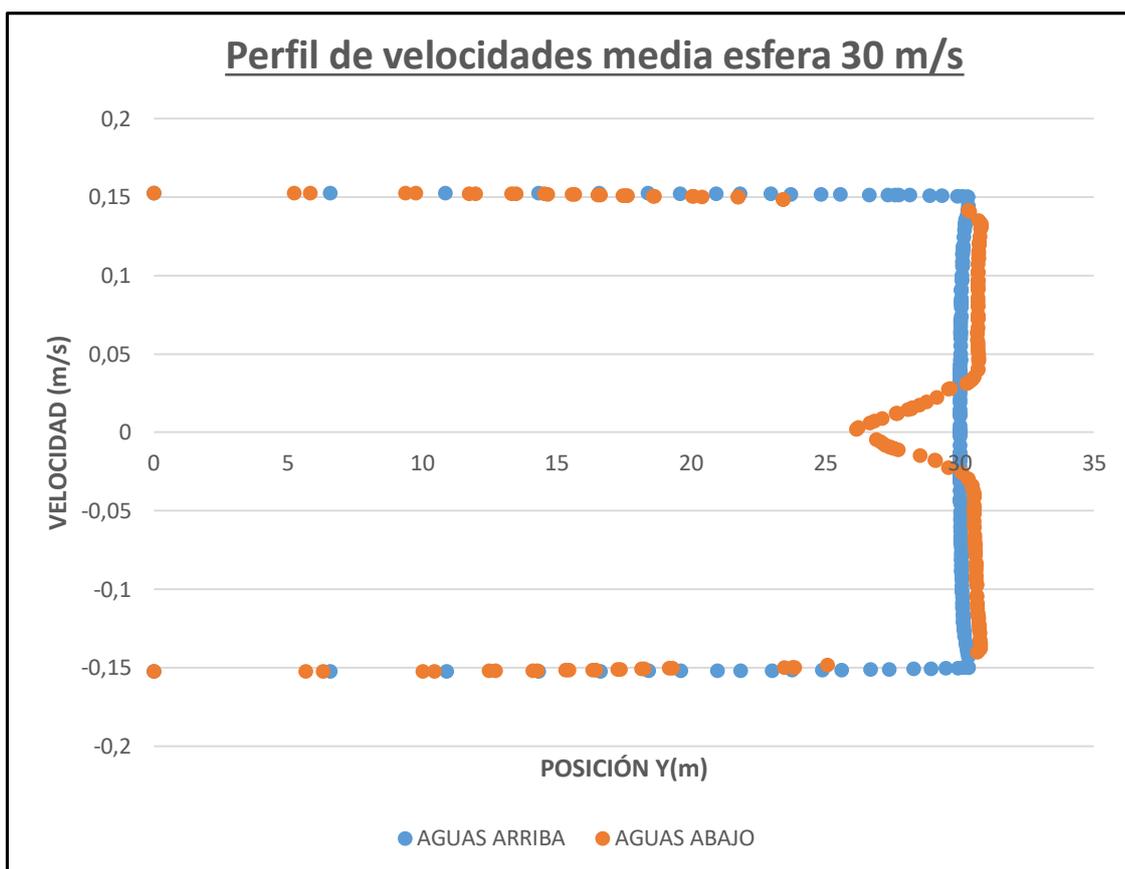


Figura 4.51. Perfil de velocidades de la media esfera a 30 m/s

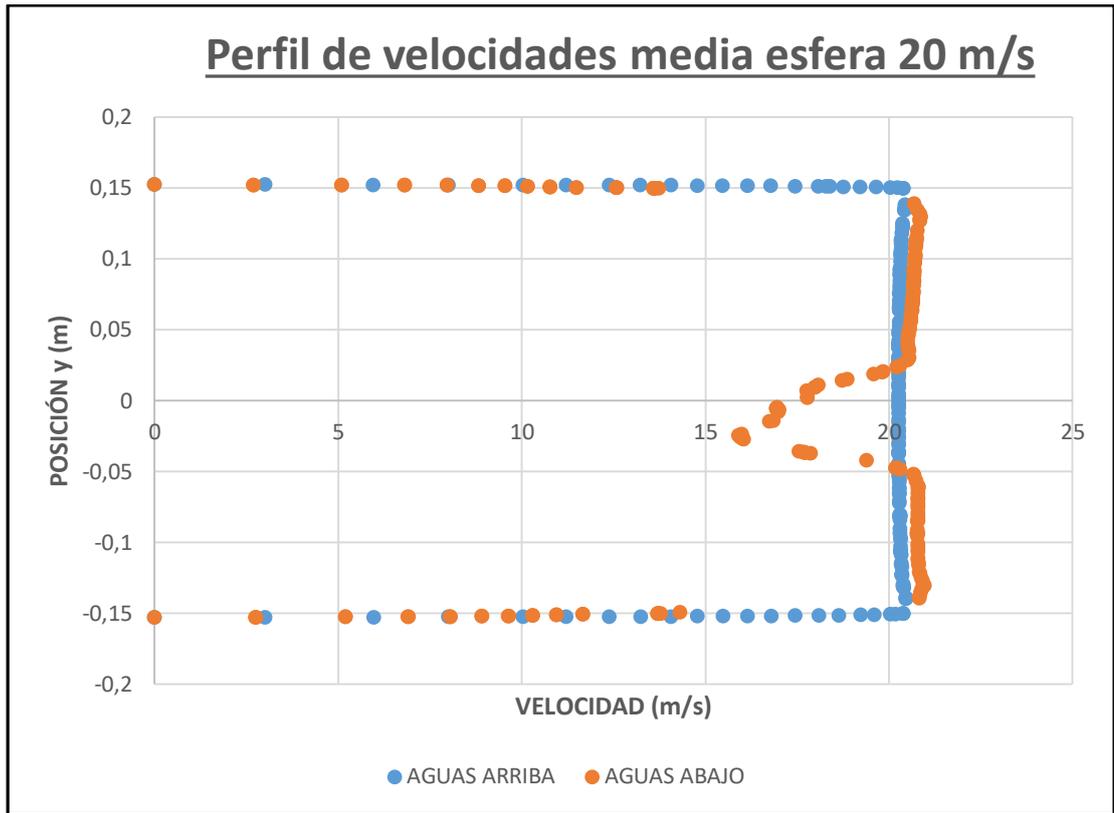


Figura 4.52. Perfil de velocidades de la media esfera a 20 m/s.

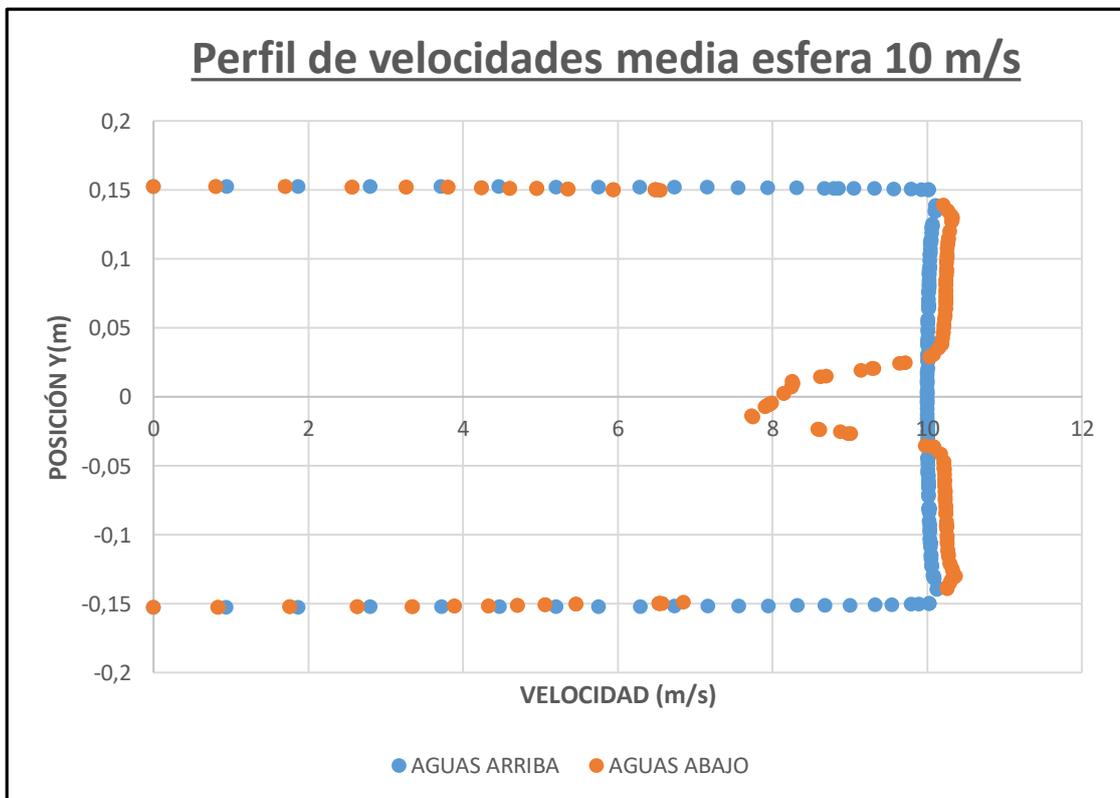


Figura 4.53. Perfil de velocidades de la media esfera a 10 m/s.

En los perfiles de velocidad de la media esfera (Figuras 4.51, 4.52 y 4.53), observamos los mismos efectos que veíamos en la esfera lisa. Por la teoría de no deslizamiento partimos de una velocidad nula en las paredes de la cámara y va aumentando según nos vamos alejando de éstas hasta alcanzar la velocidad inicial de entrada. Observamos una disminución de velocidad aguas abajo producido por la estela que genera el modelo al paso del aire. En este caso podemos apreciar que ésta disminución de velocidad se sostiene durante más tiempo, es decir, que la estela que genera la estela es más amplia que la de la esfera lisa.

Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo se ha estudiado el comportamiento de un flujo de aire alrededor de una esfera lisa y de una media esfera lisa. Se han realizado medidas experimentales en un túnel de viento y simulaciones numéricas con CFD. En las simulaciones CFD se han realizado diferentes mallas, con el objetivo de observar la influencia de la malla en los resultados. Los modelos de turbulencia utilizados son el SST $k-\omega$ y el SAS, para determinar la influencia del modelo de turbulencia en los resultados.

Uno de los objetivos de este proyecto era comparar los resultados experimentales con las simulaciones. Los valores obtenidos con CFD del coeficiente de arrastre, C_D , han tenido bastante discrepancia con los resultados experimentales, ya que se han obtenido valores inferiores a los esperados. Los mejores resultados del coeficiente de resistencia se han obtenido con el modelo de turbulencia SAS, donde para la esfera lisa obtenemos un error relativo de un 25% respecto al valor experimental y en el caso de la media esfera lisa del 21%.

Hay que tener en cuenta que los datos experimentales arrastran una serie de errores tanto humanos, como de los instrumentos de medida utilizados, y que para poder determinarlos hubiese sido necesario realizar múltiples medidas experimentales y determinar su error experimental, pero que no fue posible realizar.

Sin embargo, los resultados obtenidos de los mapas contornos de velocidad, de presión y de vectores de velocidad, así como de los perfiles de velocidad aguas arriba y aguas abajo del cuerpo de estudio, se ajustan bastante bien a lo que se esperaba obtener una vez estudiada la teoría. Se ha visualizado la capa límite sobre la superficie y donde se produce el desprendimiento de la capa límite, se ha demostrado el Principio de Bernoulli en el flujo, comprobado los efectos que tanto las características de la geometría como las del fluido que la atraviesa (representado con el número de Reynolds), tienen un impacto determinante en su comportamiento aerodinámico. De hecho, se ha observado una estela que concuerda con las imágenes que se muestran en la teoría para una esfera lisa en estado laminar y los vórtices que se generan en la parte posterior de ésta una vez se desprende la capa límite.

Como continuación del presente trabajo sería interesante realizar nuevas simulaciones con CFD de las geometrías de estudio, junto a las barras de sujeción

que se emplean en el túnel de viento, para determinar si influyen en la determinación del coeficiente de arrastre, así como utilizar nuevos modelos de turbulencia.

También sería importante poder realizar más mediciones experimentales con el objetivo de determinar el error experimental, así como verificar que la báscula de medición de fuerzas del túnel de viento está bien calibrada.

Presupuesto

A continuación, se muestra el presupuesto de este trabajo de fin de grado.

- **Licencia ANSYS FLUENT:**

$$15000 \frac{\text{€}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 1,71 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

Aquí tenemos que contar especialmente con el tiempo invertido en la creación de las mallas, tiempo de las simulaciones y el análisis posterior de los resultados.

Teniendo en cuenta que las simulaciones con la esfera lisa se realizaron en 11 días en total y 3 en días en la media esfera. Además, sumamos 2 horas para configurar las mallas y otras 2 para recoger datos e imágenes de los resultados.

$$\left(14 \text{ días} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} + 4 \text{ h}\right) \cdot \frac{1,71 \text{ €}}{1 \text{ h}} = 581,56 \text{ €}$$

- **Licencia de SolidWorks:**

$$500 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \cdot \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 0,69 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

Si se utilizó 6 horas para hacer los diseños 3D y 1 hora para los planos:

$$0,69 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 7 \text{ h} = 4,9 \text{ €}$$

- **Alquiler de un laboratorio con túnel de viento.**

El coste del túnel de viento es de unos 150 €/semana. Los datos experimentales se tomaron en una semana.

$$150 \frac{\text{€}}{\text{semana}} \cdot 1 \text{ semana} = 150 \text{ €}$$

- **Costes del personal**

Considerando que el sueldo del ingeniero es de 30 (este precio hora seria genial, pero es más real 30 €/h) y se han trabajado 2h/día durante 20 semanas.

$$30 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot \frac{2\text{h}}{\text{día}} \cdot \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} \cdot 20 \text{ semanas} = 8400\text{€}$$

Licencia ANSYS FLUENT	581,56 €
Licencia SolidWorks	4,9 €
Túnel de viento	150 €
Personal	8400 €
Total	9136,46 €
21% IVA	1918,65 €
TOTAL+IVA	11055,11 €

Bibliografía

[1] Yumusa A. Çengel & John M. Cimbala (2006). *Mecánica de Fluidos – Fundamentos y aplicaciones* 1ª edición.

[2] Frank M. White (2003). *Mecánica de Fluidos* 5ª edición.

[3] FUNDAMENTOS DE AERODINÁMICA | Shady White - Academia.edu

https://www.academia.edu/10684428/FUNDAMENTOS_DE_AERODIN%C3%81MICA

[4] ¿Qué es el flujo laminar? Flujo viscoso: definición (thermal-engineering.org)

<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-flujo-laminar-flujo-viscoso-definicion/>

[5] Cortando el viento: la importancia de la aerodinámica en los coches

<https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/importancia-aerodinamica-coche-cx-cy-czs>

[6] ¿Por qué vuela un avión? | Cursos de Aviación Online - Flightdemy (gcs-limited.co.uk).

<http://gcs-limited.co.uk/blog/como-vuela-un-avion>

[7] Coeficiente de arrastre - Wikipedia, la enciclopedia libre

https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_arrastre

[8] ¿Cómo vuelan los aviones? - Youtube/AprendeIngeniería

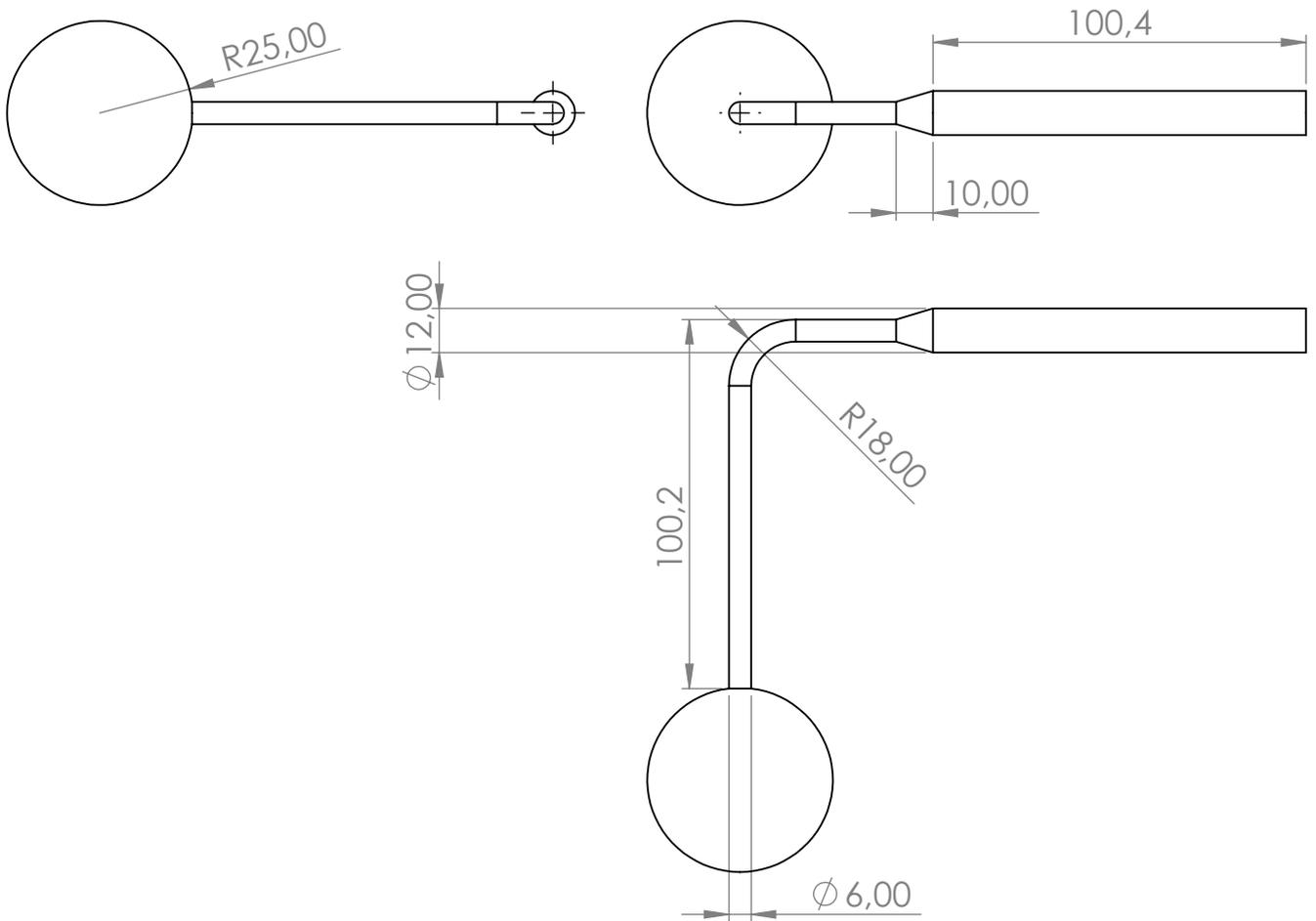
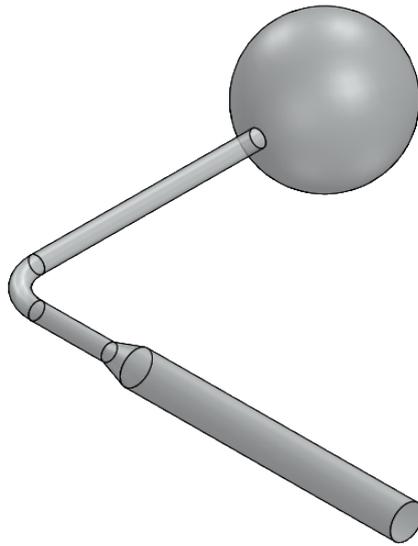
<https://www.youtube.com/watch?v=BTfWFG3lg6c>

[9] Túnel de viento - Wikipedia, la enciclopedia libre

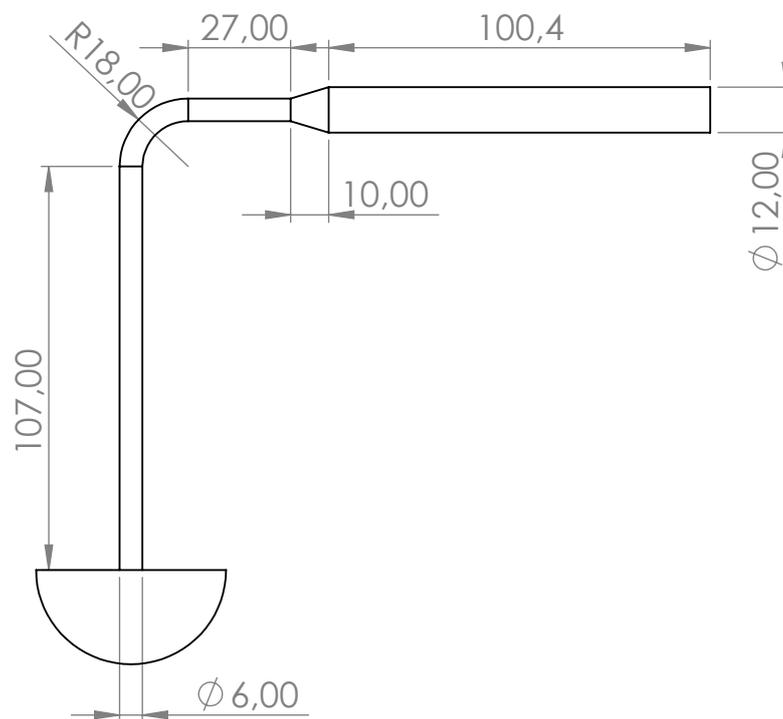
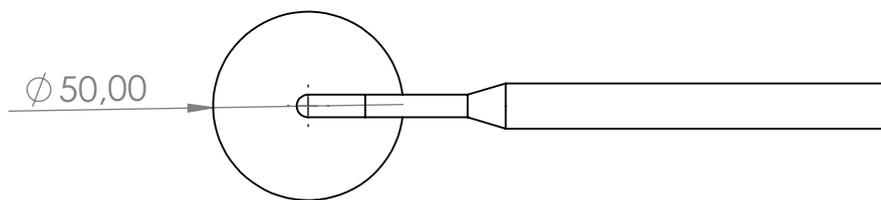
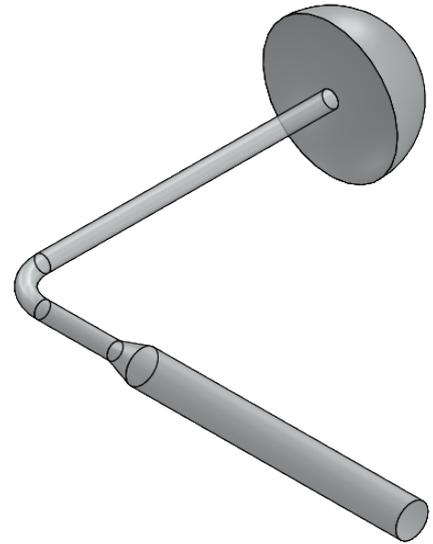
https://es.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_de_viento

Anexo A

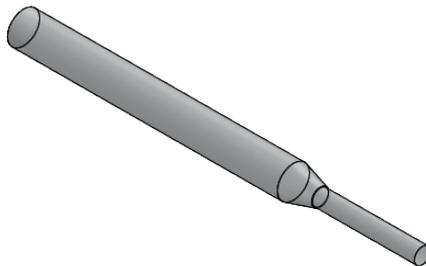
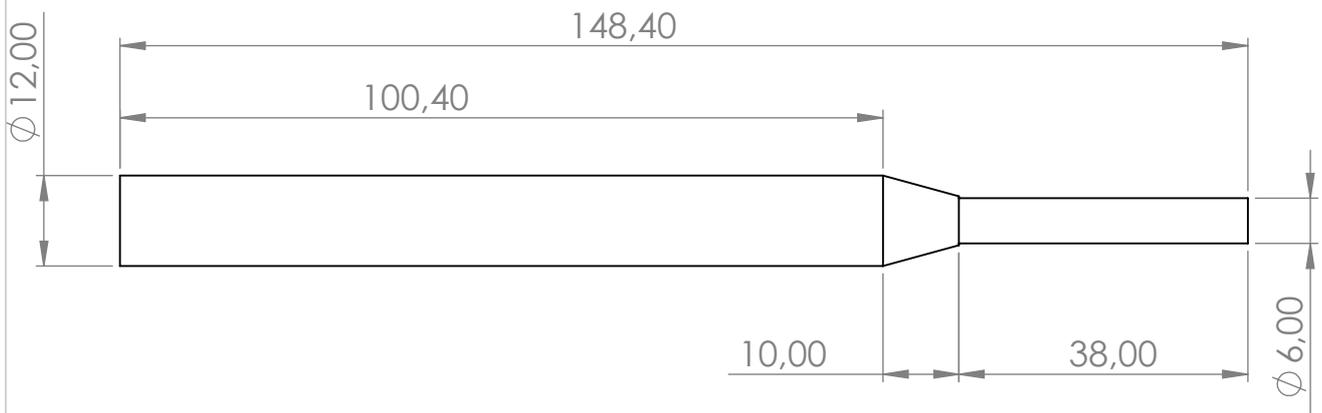
En este anexo A se muestran los planos de las geometrías utilizadas en el túnel de viento y los ensamblajes de éstas en la cámara de ensayo del túnel.



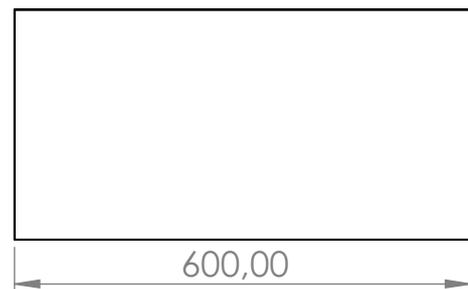
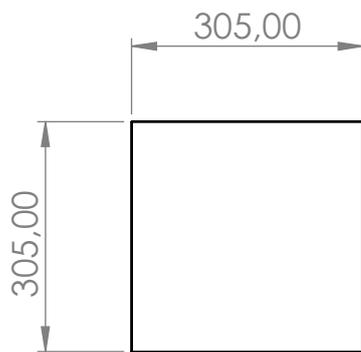
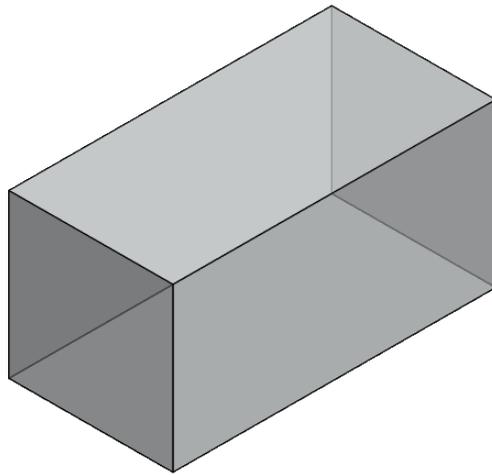
D eterminación de fuerzas aerodinámicas en una esfera y una media esfera	Grupo: 1	Pieza: Esfera con barras	Plano nº: nº1
Revisado: Alfred Fontanals	Fecha de entrega: 17/01/2021		Cantidad: 1
Dibujado: Raúl Troyano Sánchez	Formato: DIN A4	Escala: 1:2	Projecció: 
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	Masa: XXXXXXX	Material: XXXXXXX	



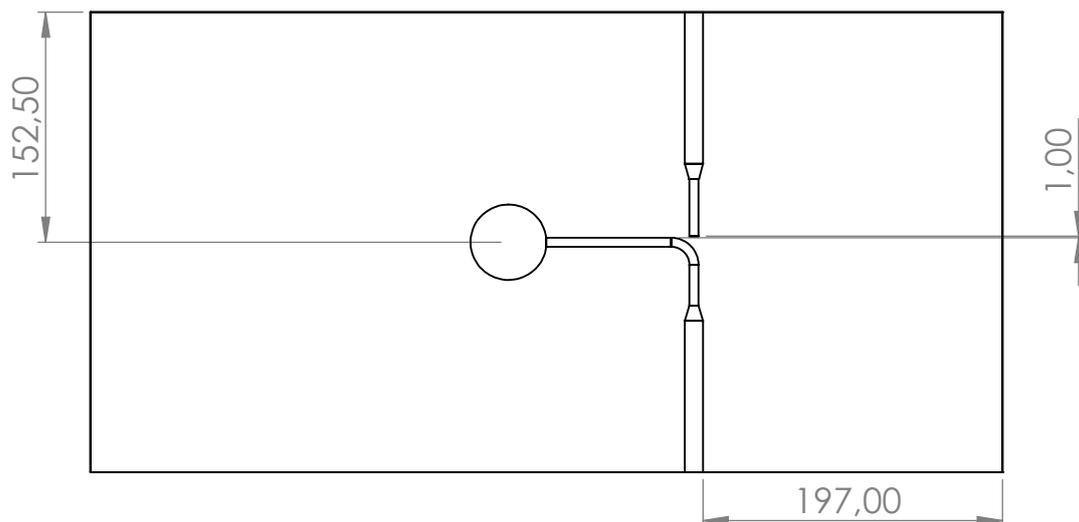
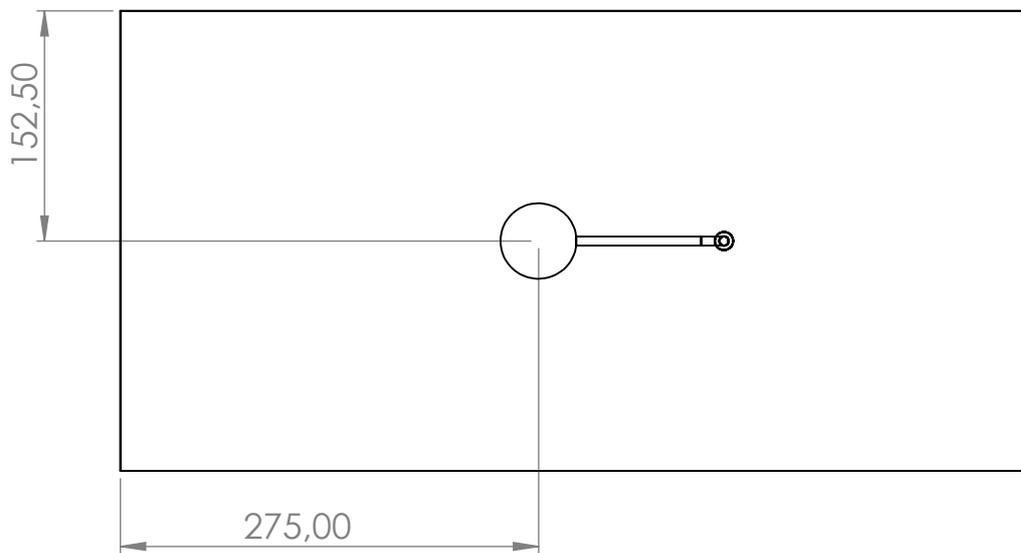
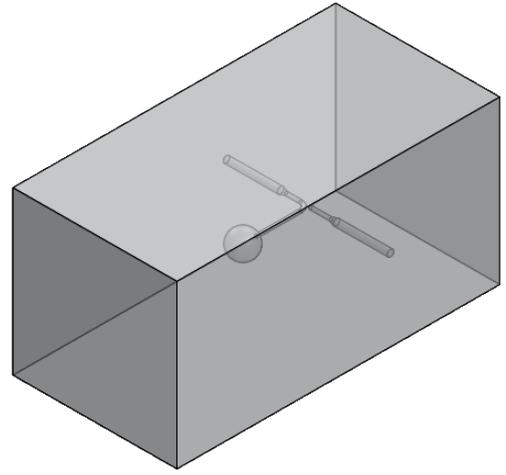
Determinación de fuerzas aerodinámicas en una esfera y una media esfera	Grupo: 1	Pieza: Media esfera con barras	Plano nº: nº2
Revisado: Alfred Fontanals		Fecha de entrega: 17/1/2021	Cantidad: 1
Dibujado: Raúl Troyano Sánchez		Formato: DIN A4	Escala: 1:2
		Masa: XXXXXX	Proyección: 
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		Material: XXXXXX	



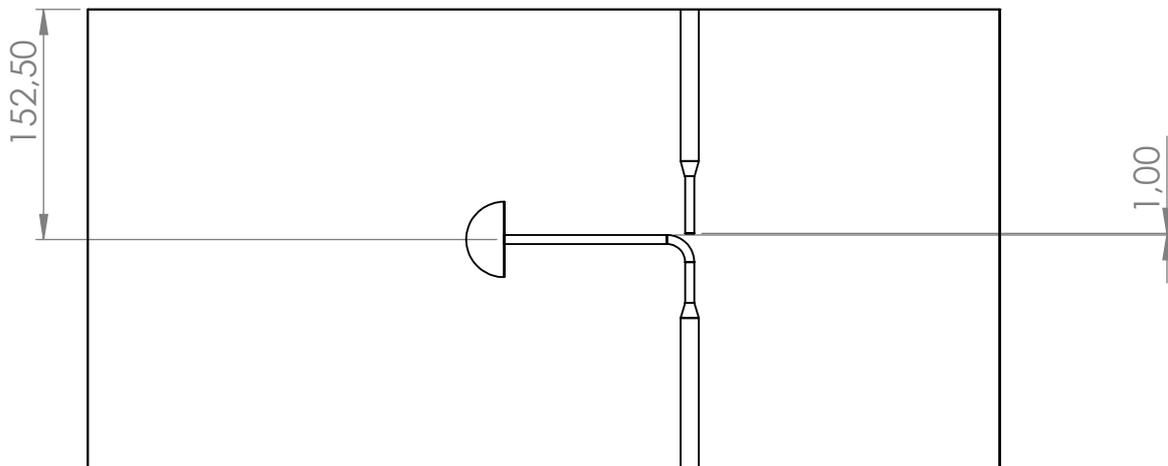
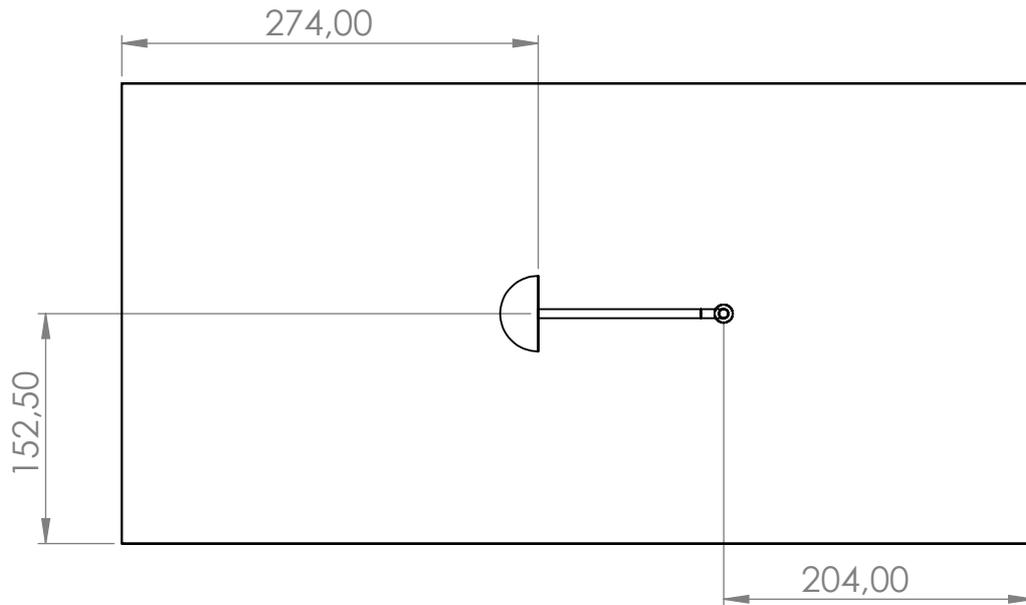
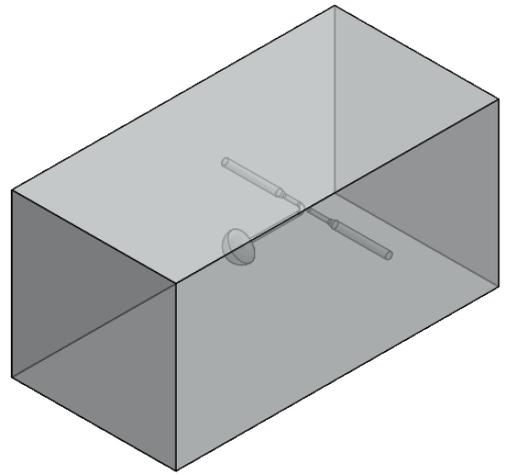
Determinación de fuerzas aerodinámicas en una esfera y una media esfera	Grupo: 1	Pieza: Barra dummy	Plano nº: nº3
Revisado: Alfred Fontanals		Fecha de entrega: 17/01/2021	Cantidad: 1
Dibujado: Raúl Troyano Sánchez		Formato: DIN A4	Escala: 1:1
		Masa: XXXXXX	Proyección: 
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		Material: XXXXXX	

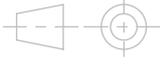


Determinación de fuerzas aerodinámiques en una esfera y una media esfera	Grupo: 1	Pieza: Cámara de ensayo	Plano nº: nº4
Revisado: Alfred Fontanals		Fecha de entrega: 17/01/2021	
Dibujado: Raúl Troyano Sánchez		Formato: DIN A4	Escala: 1:10
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		Masa: XXXXXX	Proyección:  Material: XXXXXX



D eterminación de fuerzas aerodinámicas en una esfera y media esfera	Grupo: 1	Pieza: Ensamblaje esfera con barras	Plano nº: nº5
Revisado: Alfred Fontanals	Fecha de entrega: 17/01/2021		Cantidad: 1
Dibujado: Raúl Troyano Sánchez	Formato: DIN A4	Escala: 1:5	Proyección: 
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	Masa: XXXXXX	Material: XXXXXX	



Determinación de fuerzas aerodinámicas en una esfera y media esfera	Grupo: 1	Pieza: Ensamblaje media esfera con barras	Plano nº: nº6
Revisado: Alfred Fontanals		Fecha de entrega: 17/01/2021	Cantidad: 1
Dibujado: Raúl Troyano Sánchez		Formato: DIN A4	Escala: 1:5
		Masa: XXXXXX	Proyección: 
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		Material: XXXXXX	