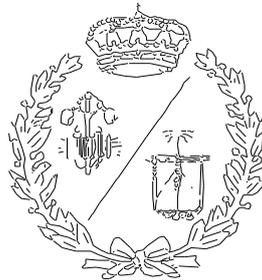


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



*Trabajo Fin de Grado*

**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO  
AERODINÁMICO DE UN AUTOMÓVIL  
SOMETIDO A LA ACCIÓN DEL VIENTO  
(Simulation of the aerodynamic behavior of a  
car subjected to wind action)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

**Autor: Fernando Errea Saiz**

**Septiembre - 2019**



---

## ***Índice general***

---

<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
1.1 Objetivos.....	11
1.2 Alcance .....	11
1.3 Limitaciones .....	11
<b>2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....</b>	<b>13</b>
<b>3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>19</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	19
3.1.1 Mecánica de fluidos .....	19
3.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	21
3.2.1 Densidad .....	22
3.2.2 Peso específico .....	22
3.2.3 Compresibilidad.....	22
3.2.4 Número de Mach.....	23
3.2.5 Viscosidad.....	23
3.3 TIPOS DE FLUJO .....	26
3.3.1 Flujo viscoso y no-viscoso .....	26
3.3.2 Flujo interno y externo.....	27
3.3.3 Flujo compresible e incompresible.....	27
3.3.4 Flujo laminar y turbulento.....	27
3.3.5 Flujo natural y forzado .....	28
3.4 CAPA LÍMITE.....	28
3.4.1 Número de Reynolds .....	30
3.4.2 Resistencia de forma.....	31
3.5 ECUACIÓN DE BERNOULLI .....	32
3.6 CINEMÁTICA DE FLUIDOS.....	35
3.6.1 Campo de aceleraciones .....	36
3.6.2 Teorema del transporte de Reynolds .....	38

---

3.6.3	Vorticidad .....	39
<b>3.7</b>	<b>TURBULENCIA .....</b>	<b>40</b>
3.7.1	Modelo de Spalart-Allmaras.....	42
3.7.2	Modelo k- $\epsilon$ standard .....	43
3.7.3	Modelo RNG k- $\epsilon$ .....	44
3.7.4	Modelo k- $\epsilon$ realizable .....	45
<b>3.8</b>	<b>GRÁFICAS DE FLUJO .....</b>	<b>46</b>
3.8.1	Gráficas de perfiles .....	46
3.8.2	Gráficas vectoriales.....	47
3.8.3	Gráficas de contorno .....	47
<b>3.9</b>	<b>AERODINÁMICA .....</b>	<b>48</b>
3.9.1	Fuerzas de arrastre y sustentación.....	49
3.9.2	Arrastre debido a fricción y a presión.....	52
3.9.3	Reducción del arrastre mediante el diseño aerodinámico .....	53
3.9.4	Eficiencia aerodinámica .....	54
<b>4</b>	<b>MODELADO.....</b>	<b>55</b>
4.1	SOFTWARE: AUTODESK FUSION 360.....	55
4.2	AHMED BODY.....	56
4.3	MODELO 1 .....	58
4.4	MODELO 2 .....	61
<b>5</b>	<b>SIMULACIÓN AERODINÁMICA MEDIANTE CFD.....</b>	<b>64</b>
5.1	SOFTWARE .....	64
5.2	PROCEDIMIENTO.....	65
5.2.1	Dominio computacional.....	65
5.2.2	Mallado .....	67
5.2.3	Parámetros del sistema .....	70
<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
6.1	AHMED BODY.....	77
6.2	MODELO 1 .....	79
6.3	MODELO 2 .....	81
<b>7</b>	<b>IMPACTO ENERGÉTICO DE LA AERODINÁMICA.....</b>	<b>85</b>

---

**8 CONCLUSIONES.....87**

**9 BIBLIOGRAFÍA .....90**

---

## *Índice de figuras*

---

Figura 1. Ford T de 1908 (Wikipedia).....	13
Figura 2. Rumpler-Tropfenwagen de 1921 (Wikipedia).....	14
Figura 3. Citroën DS de 1955 (Citroën Origins).....	15
Figura 4. Renault 4 de 1961 .....	15
Figura 5. Volkswagen Golf de 1975 [9].....	16
Figura 6. Lancia Stratos de 1971.....	16
Figura 7. Opel Calibre de 1989.....	17
Figura 8. Audi A7 de 2019.....	18
Figura 9. Relación esfuerzo-deformación de un fluido newtoniano [1] .....	24
Figura 10. Relación viscosidad-temperatura de un fluido [1].....	25
Figura 11. Corriente de fluido sobre una placa plana [1] .....	26
Figura 12. Ejemplo de flujo laminar y turbulento [1].....	28
Figura 13. Espesor de la capa límite en una placa [2].....	29
Figura 14. Coeficiente de presión en función del número de Reynolds en una placa plana [1].....	31
Figura 15. Desprendimiento de la capa límite [3] .....	32
Figura 16. Fuerzas que actúan sobre una partícula a lo largo de una línea de corriente [1] .....	33
Figura 17. Teorema del transporte de Reynolds [1] .....	38
Figura 18. Flujo rotacional [1] .....	40
Figura 19. Ejemplo de gráfica del perfil de velocidad [1] .....	47
Figura 20. Ejemplo de gráfica vectorial [1].....	47
Figura 21. Ejemplo de gráfica de contorno [1].....	48

---

Figura 22. Fuerzas y momentos que actúan sobre un cuerpo sumergido en un fluido [8] .....	49
Figura 23. Representación gráfica de las fuerzas de arrastre y sustentación sobre un coche.....	50
Figura 24. Fuerzas de presión y viscosas sobre un cuerpo bidimensional [1].....	51
Figura 25. Variación del coeficiente de arrastre con el ángulo de ataque [7] .....	52
Figura 26. Variación de los diferentes coeficientes de arrastre [1] .....	54
Figura 27. Diseño en 3D del Ahmed body en Autodesk Fusion 360 .....	56
Figura 28. Perspectiva lateral del Ahmed body donde se muestra el ángulo de inclinación ( $\beta$ ) .....	57
Figura 29. Perspectiva frontal del Ahmed body .....	58
Figura 30. Mercedes A 220 Sedan 4MATIC (modelo 2019).....	59
Figura 31. Diseño en 3D del modelo 1 en Autodesk Fusion 360.....	59
Figura 32. Perspectiva lateral del modelo 1.....	60
Figura 33. Perspectiva frontal del modelo 1 .....	60
Figura 34. Perspectiva general trasera del modelo 1 .....	60
Figura 35. Mercedes W124 (modelo de 1984) .....	61
Figura 36. Diseño en 3D del modelo 2 en Autodesk Fusion 360.....	62
Figura 37. Perspectiva frontal del modelo 2 .....	62
Figura 38. Perspectiva general trasera del modelo 2 .....	63
Figura 39. Perspectiva lateral del modelo 2.....	63
Figura 40. Interfaz de Ansys Workbench con un proyecto de Fluent (ANSYS v2019) .....	65
Figura 41. Esquema con las medidas del dominio computacional [4] .....	66
Figura 42. Dominio computacional del modelo 1 .....	67
Figura 43. Mallado del modelo 1 .....	67
Figura 44. Detalle de la malla del modelo 1.....	68

---

---

Figura 45. Detalle de la malla en la superficie y caras del modelo 1 .....	68
Figura 46. Detalle de la variación de tamaño y concentración de elementos de la malla .....	69
Figura 47. Gráfica de los residuos del modelo 1 .....	72
Figura 48. Monitor del coeficiente de arrastre del modelo 1 .....	73
Figura 49. Monitor del coeficiente de sustentación del modelo 1 .....	73
Figura 50. Gráfica de contorno de la velocidad del fluido (m/s).....	77
Figura 51. Gráfica de las líneas de flujo en el Ahmed body.....	78
Figura 52. Gráfica de la turbulencia correspondiente al Ahmed body .....	78
Figura 53. Gráfica del coeficiente de presión en el Ahmed body.....	78
Figura 54. Gráfica de las líneas de corriente (velocidad) para el modelo 1 .....	79
Figura 55. Detalle de los vórtices en la parte trasera del modelo 1 .....	80
Figura 56. Gráfica de las líneas de corriente (presión) para el modelo 1 .....	80
Figura 57. Gráfica de la presión total sobre la superficie del modelo 1 .....	81
Figura 58. Gráfica de las líneas de corriente (velocidad) para el modelo 2.....	82
Figura 59. Detalle de los vórtices en la parte trasera del modelo 2 .....	82
Figura 60. Detalle del vórtice en la parte frontal del modelo 2.....	83
Figura 61. Gráfica de contorno de la presión estática para el modelo 2.....	83
Figura 62. Gráfica de la presión total sobre la superficie del modelo 2 .....	84

## ***Índice de tablas***

---

Tabla 1. Número de componentes del mallado por modelo .....	69
Tabla 2. Propiedades del aire en nuestro sistema.....	70
Tabla 3. Valores del área proyectada para cada modelo .....	71
Tabla 4. Resultados de los componentes del arrastre en cada modelo .....	75
Tabla 5. Resultados de los componentes de la sustentación en cada modelo.....	76

## ***Resumen del proyecto***

---

Mediante este proyecto se pretende analizar, aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD), el comportamiento aerodinámico de un automóvil que circula a 120 km/h (límite marcado por la legislación española para un turismo) y está sometido a un viento frontal adverso de 20 km/h. Para ello comenzaremos realizando el modelado en 3D, a través del software Fusion 360, del Ahmed body, el cual es un cuerpo conformado por geometrías básicas que se asemeja a grandes rasgos a la estructura de un vehículo. Este nos permitirá introducirnos en el estudio de la aerodinámica básica de un automóvil, ya que, a pesar de descuidar una serie de particularidades propias de un coche real, genera las características esenciales que debemos conocer: coeficientes de arrastre y sustentación y fenómenos del flujo (turbulencia, vorticidad, desprendimiento, recirculación).

Posteriormente, crearemos dos modelos de turismo con el mayor detalle posible dentro de nuestras limitaciones, el primero (modelo 1) semejante a un vehículo actual y por tanto con una geometría mas cuidada y aerodinámica, y el segundo (modelo 2) a un turismo clásico de la década de los años 80. A través de estos dos diseños conseguiremos plasmar el desarrollo aerodinámico experimentado en la industria automovilística en materia de diseño de carrocerías y compararemos las principales diferencias acontecidas en el flujo.

Finalmente, partiendo de los resultados de las fuerzas de arrastre para los modelos 1 y 2, desarrollaremos el impacto que tiene el avance en el diseño aerodinámico obteniendo el ahorro energético en términos de combustible requerido para vencer a la resistencia del viento.

## ***Project summary***

---

This project aims to analyze, using computational fluid dynamics (CFD), the aerodynamic behavior of a car travelling at 120 km / h (limit by law) and subjected to an adverse frontal wind of 20 km/h. In order to achieve this, we will begin with 3D modeling, through the Fusion 360 software, of the Ahmed body, which is made up of basic geometries that closely resembles the structure of a vehicle. This will allow us to introduce ourselves to the study of the basic aerodynamics of a car, since, despite neglecting a series of characteristics of a real car, it generates the essential characteristics that we must know: drag and lift coefficients and flow phenomena (turbulence, vorticity, detachment, recirculation).

Later on, we will create two car models with as much detail as possible within our limitations, the first one (model 1) similar to a current vehicle and therefore with a more careful and aerodynamic geometry, and the second (model 2) similar to a classic tourism from the 80's. Through these two designs we will be able to capture the aerodynamic development experienced in the car industry in the field of body design and compare the main differences in the flow.

Finally, based on the results of the drag forces for models 1 and 2, we will calculate the impact of the development on the aerodynamic design by obtaining the energy savings in terms of fuel required to overcome wind resistance.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Objetivos

Este estudio tiene como objetivo principal realizar un análisis aerodinámico mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) de un automóvil bajo condiciones de viento frontal adverso, obteniendo los parámetros característicos que definen su comportamiento. Asimismo, analizaremos los fenómenos del flujo más notables que tendrán lugar alrededor del modelo, tales como turbulencia, vorticidad, recirculación o desprendimiento.

Posteriormente, examinaremos el impacto que tiene la evolución de la aerodinámica en la eficiencia energética mediante el diseño de dos carrocerías basadas en automóviles de diferentes épocas y compararemos los resultados obtenidos.

Por último, uno de los objetivos con mayor trascendencia es el aprendizaje del procesado mediante dinámica de fluidos computacional, debido a que hoy en día estos softwares son de uso extendido, facilitando la resolución de problemas de alta complejidad.

## 1.2 Alcance

Mediante este proyecto profundizaremos en el procesado computacional llevado a cabo en una simulación de elementos finitos, prestando especial atención a las diferentes configuraciones disponibles. Como es evidente nos será imposible alcanzar el grado de complejidad y precisión llevado a cabo por las compañías automovilísticas en sus diferentes pruebas de diseño, pero nosotros tendremos a nuestra disposición las herramientas necesarias para comprender las principales características de la aerodinámica de un vehículo, así como los fenómenos del flujo que acontecerán alrededor del mismo.

## 1.3 Limitaciones

Una de las principales dificultades a la hora de llevar a cabo nuestro estudio está relacionada con el modelado de los automóviles. Es decir, debido al grado de complejidad y detalle en la carrocería de un automóvil, nos tendremos que ver

obligados a realizar múltiples simplificaciones geométricas que tendrán un cierto impacto en los resultados de los diferentes parámetros aerodinámicos. Además, debemos tener en cuenta que el modelo de turbulencia que apliquemos en nuestro procesado puede derivar en una desviación con respecto su funcionamiento experimental.

No obstante, este margen de error no tendrá una mayor relevancia en nuestro proyecto. Un elevado grado de precisión requeriría la creación de un mallado de alto nivel, y por tanto trabajar con una potencia computacional y tiempo de procesado de los que no disponemos.

## 2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia los esfuerzos que actúan sobre un sólido cuando existe un movimiento relativo entre este y el fluido que lo rodea, siendo este un gas.

Actualmente la ingeniería aerodinámica es un elemento fundamental que está instaurado en la industria automovilística, pero esta no recibió la atención suficiente hasta mediados del siglo pasado. Por este motivo, el diseño de los automóviles ha ido experimentando una evolución gradual, enfocada a disminuir la resistencia al avance del vehículo.

A finales del siglo XIX y principios del XX, la preocupación de los fabricantes estaba centrada en el desarrollo y optimización de los componentes mecánicos (motor y transmisión), así como en el diseño de una carrocería lo más estética posible. El único interés en la aerodinámica durante esta época estaba enfocado a conseguir una mejor penetración en el aire en pos de una mayor velocidad. Esto se vio reflejado en la comercialización del popular Ford T en 1908, el cual poseía una estética más propia de un coche de caballos. Su diseño era rectangular, demasiado alto para la comodidad de los pasajeros y, además estaba dotado de un techo retráctil de lona que hacía «efecto bolsa» en la resistencia del aire [9].

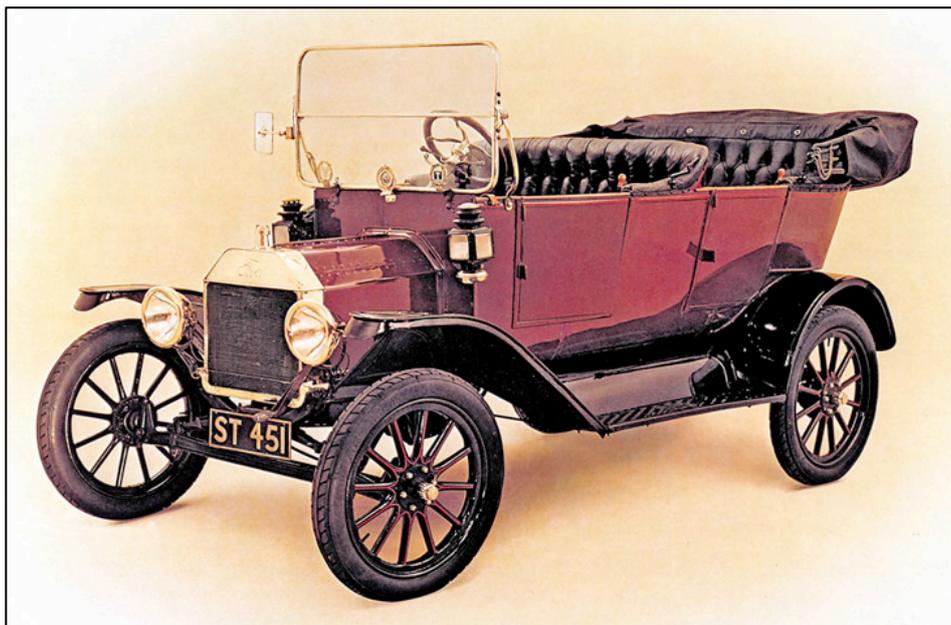
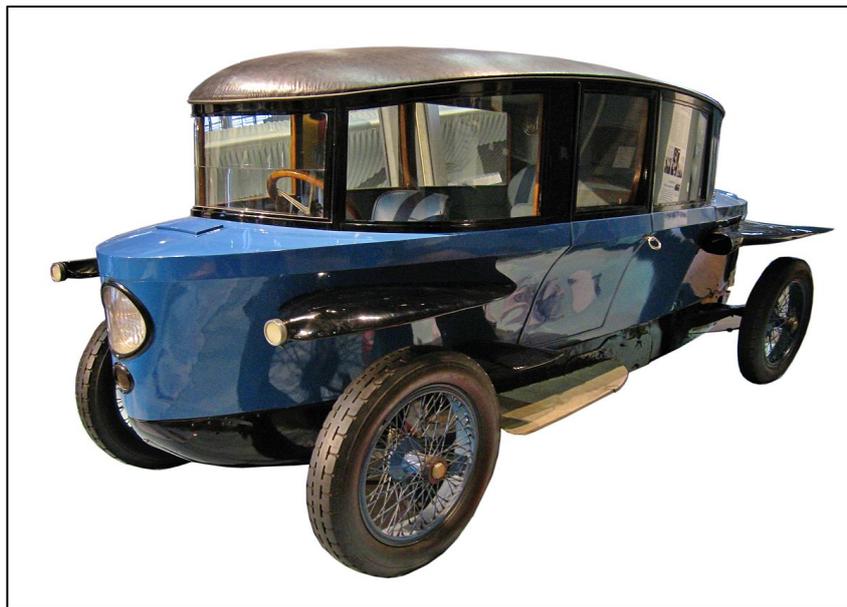


Figura 1. Ford T de 1908 (Wikipedia)

La siguiente evolución en el diseño aerodinámico tuvo lugar en 1921, cuando el alemán Edmund Rumpler diseñó el Rumpler-Tropfenwagen, cuya forma emulaba a la de una gota de agua. El coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) de este modelo era de solo 0,27 y su novedosa estética tuvo una gran repercusión. Al mismo tiempo, los norteamericanos sacaron el Chrysler Airflow, que se basaba en la figura de un pájaro. Su peso se disponía en una relación de 50-50 (distribuía a partes iguales el peso en los dos ejes), aunque su aspecto inusual y una sociedad sumergida en la Gran Depresión lo condenaron al fracaso [9].



*Figura 2. Rumpler-Tropfenwagen de 1921 (Wikipedia)*

Tras la Segunda Guerra Mundial y con la consiguiente recesión económica europea, los pequeños coches aerodinámicos diseñados durante la década de los 30 tuvieron que esperar casi 20 años para encontrar su espacio en el mercado, pero para entonces ya fue demasiado tarde. La estandarización de las cadenas de producción provocó la imposibilidad de hacer coches «diferentes» a gran escala y esto unido a un largo periodo de bonanza en los precios del petróleo hizo que la aerodinámica pasase a un segundo plano [9].

En Estados Unidos la fiebre de la «carrera espacial» trasladó a los coches muchos elementos heredados de la aeronáutica, pero éstos tenían una función más decorativa que práctica. En Europa la visión avanzada de Jean Lefebvre y Flaminio Bertoni dio lugar al Citroën DS, un diseño basado en la aerodinámica y cuyo ADN se ha perpetuado en modelos de Citroën hasta nuestros días [9].



*Figura 3. Citroën DS de 1955 (Citroën Origins)*

Las décadas de los 50 y 60 trajeron consigo los avances más importantes en el mundo de la aerodinámica que fueron herencia de las escuderías de competición. Tal como sucede hoy en día, los ingenieros experimentaban con diferentes diseños y formas aerodinámicas que ayudaban a alcanzar una mayor velocidad punta de los automóviles [9].



*Figura 4. Renault 4 de 1961*

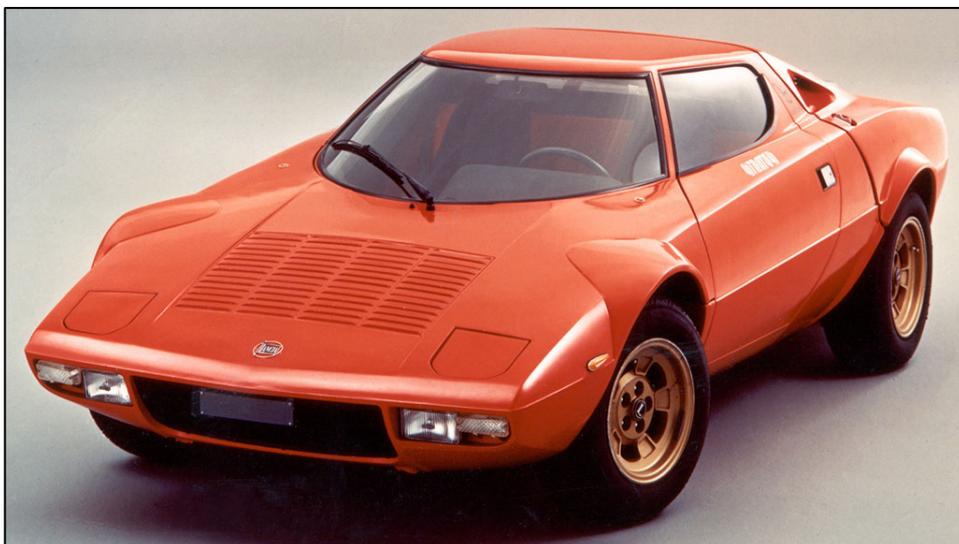
A continuación, en los años 60 y 70, los estudios se enfocaron a usar la fuerza del viento para mejorar la adherencia de los coches. Por consiguiente, empezaron a implementarse los primeros alerones, faldones y entradas de aire a los vehículos de producción, que posteriormente anexionarían los coches de competición a sus modelos [9].

Sin embargo, en 1973 un suceso tuvo un enorme impacto en todas las compañías automovilísticas, y no fue otro que la crisis del petróleo, que supuso el alza de los precios de la gasolina durante los años 70. Los ingenieros se encontraron con el reto y obligación de replantearse la construcción de los motores, y el diseño de las carrocerías. Su consecuencia fue la aparición de los coches compactos, con el Volkswagen Golf como principal exponente [9].



*Figura 5. Volkswagen Golf de 1975 [9]*

La exploración de diseños que optimizasen la aerodinámica se reflejó en el diseño de deportivos de extrema precisión, como el Lancia Stratos de 1971 o el Lotus Esprit de 1973, y también conceptos renovadores como el Renault Espace de 1984



*Figura 6. Lancia Stratos de 1971*

Esta nueva interpretación de la aerodinámica provocó una tendencia generalizada a los diseños afilados y las esquinas redondeadas en los coches de los años 80, incluso en los más pequeños como el Citroën AX cuyo slogan era «Adiós al viento en contra». El Opel Calibra de 1989 es un referente de aquella época con su  $C_D$  de 0'26 [9].



*Figura 7. Opel Calibre de 1989*

Desde los años 90 hasta nuestros días «aerodinámica» significa una cosa profundamente distinta en nuestro lenguaje y también en el de los diseñadores de coches. El estudio de los flujos de aire en la carrocería y los bajos, la búsqueda de una menor altura total de los coches o la mejora en las uniones de las planchas y plásticos ha mejorado este aspecto de forma imperceptible.

El diseño de la carrocería de un vehículo tiene una importancia decisiva en la calidad de su aerodinámica, cuestiones tales como las prestaciones, la estabilidad, la adherencia al suelo y el consumo de combustible dependen directamente de las formas de la carrocería y de su aerodinámica [9].



*Figura 8. Audi A7 de 2019*

La aerodinámica en nuestro tiempo se ha vuelto invisible. Ya no depende de formas fluidas o afiladas, sino de la canalización de los flujos de aire, algo que requiere mucho más trabajo de desarrollo pero que el ojo apenas puede encontrar. Las marcas más punteras del mundo de la automoción emplean múltiples soluciones técnicas e invierten elevadas sumas de dinero intentando disminuir la resistencia aerodinámica de sus coches [9].

## 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Fluido es aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene. Un fluido se puede presentar en fase líquida o gaseosa.

La diferencia entre un sólido y un fluido se establece con base a la capacidad de la sustancia para oponer resistencia a un esfuerzo cortante (o tangencial) aplicado que tiende a deformarlo. Un sólido puede oponer resistencia a un esfuerzo cortante aplicado por medio de la deformación, en tanto que un fluido se deforma de manera continua bajo la influencia del esfuerzo cortante, sin importar lo pequeño que sea. En los sólidos, el esfuerzo es proporcional a la deformación, pero en los fluidos el esfuerzo es proporcional a la razón de deformación [1].

#### 3.1.1 Mecánica de fluidos

La rama de la física encargada de estudiar el comportamiento de los fluidos, tanto en reposo (estática de fluidos) como en movimiento (dinámica de fluidos), así como las fuerzas que lo generan es la mecánica de fluidos. También estudia los procesos de interacción de los fluidos con otros fluidos o con cuerpos sólidos.

La mecánica de fluidos se divide en varias categorías, el estudio del movimiento de fluidos que son prácticamente incompresibles (como los líquidos, en especial el agua y los gases a bajas velocidades) suele mencionarse como hidrodinámica. Una subcategoría de ésta es la hidráulica, que estudia los flujos de líquidos en tubos y canales abiertos. La dinámica de gases trata del flujo de fluidos que sufren cambios significativos en la densidad, como el flujo de gases a través de toberas a altas velocidades. La categoría aerodinámica se ocupa del flujo de gases (en especial del aire) sobre cuerpos como aviones, cohetes y automóviles a altas o bajas velocidades. Algunas otras categorías como la meteorología, la oceanografía y la hidrología tratan de flujos que ocurren de manera natural.

La mecánica de fluidos se utiliza ampliamente en actividades cotidianas y en el diseño de sistemas modernos de ingeniería, desde aspiradoras hasta aviones supersónicos. Por lo tanto, resulta importante desarrollar una comprensión adecuada

de sus principios básicos. Para empezar, la mecánica de fluidos tiene un papel vital en el cuerpo humano. El corazón bombea constantemente sangre a todas las partes del cuerpo a través de las arterias y venas, y los pulmones son las regiones de flujo de aire en direcciones alternadas. Los corazones artificiales, las máquinas de respiración y los sistemas de diálisis están diseñados con base en la aplicación de la mecánica de fluidos [1].

A una escala más amplia, la mecánica de fluidos desempeña una parte importante en el diseño y análisis de aviones, coches, barcos, submarinos, cohetes, motores de propulsión a chorro, turbinas de viento, aparatos biomédicos, sistemas de enfriamiento de componentes electrónicos... También se considera para el diseño de edificios, puentes e incluso de vallas publicitarias para asegurar que las estructuras puedan soportar la intensidad del viento. Numerosos fenómenos naturales como el ciclo de lluvias, los patrones meteorológicos, la elevación del agua del suelo hasta la punta de los árboles, los vientos, las olas del océano y las corrientes en las grandes masas de agua también son regidos por los principios de la mecánica de fluidos [1].

Centrándonos ahora en su aplicación en automóviles, podríamos afirmar que todos los componentes asociados con el transporte del combustible del tanque de éste hacia los cilindros (la línea de suministro del combustible, la bomba, los inyectores o el carburador) así como la mezcla del combustible con el aire en los cilindros y el purgado de los gases de combustión en los tubos de escape se analizan aplicando la mecánica de fluidos. Ésta también se aplica en el diseño del sistema de calefacción y acondicionamiento del aire, de los frenos hidráulicos, de la dirección hidráulica, de la transmisión automática y los sistemas de lubricación, del sistema de enfriamiento que incluye el radiador y la bomba de agua, además de los neumáticos [1].

Pero lo que nos interesa en nuestro caso es su aplicación en el diseño aerodinámico de la carrocería de los automóviles, así como su continuo esfuerzo por minimizar la fuerza de arrastre mediante la aplicación de un extenso análisis del flujo sobre superficies [1].

## 3.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Cualquier característica de un sistema se conoce como propiedad. Algunas de las propiedades más conocidas son la presión (P), la temperatura (T), el volumen (V), y la masa (m). La lista se puede extender hasta incluir unas menos conocidas como viscosidad, conductividad térmica, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, resistividad eléctrica e, inclusive, la velocidad y la elevación.

Se considera que las propiedades son intensivas o extensivas. Las propiedades intensivas son independientes de la masa de un sistema, como la temperatura, la presión y la densidad. Las propiedades extensivas son aquellas cuyos valores dependen del tamaño, o extensión, del sistema. La masa total, el volumen total (V), y la cantidad total de movimiento son ejemplos de propiedades extensivas.

Las propiedades extensivas por unidad de masa se llaman propiedades específicas. Algunos ejemplos de propiedades específicas son el volumen específico ( $v = V/m$ ) y la energía total específica ( $e = E/m$ ).

El estado de un sistema se describe por sus propiedades. Pero, con base en la experiencia, se sabe que no es necesario especificar todas las propiedades para identificar un estado. Después de que se especifican los valores de una cantidad suficiente de propiedades, el resto de éstas toman ciertos valores. Es decir, la especificación de un número de propiedades es suficiente para identificar un estado. El número de propiedades necesario para identificar el estado de un sistema se expresa por medio del postulado del estado: *“El estado de un sistema compresible simple queda por completo especificado por dos propiedades intensivas independientes”* [1].

Atendiendo a lo expuesto y centrándonos en el estudio aerodinámico de un vehículo, las propiedades con mayor interés son: densidad, peso específico, compresibilidad, número de Mach y viscosidad.

### 3.2.1 Densidad

La densidad de un fluido es la masa por unidad de volumen, y sus unidades son kilogramos por metros cúbicos ( $\text{kg/m}^3$ ) en el Sistema Internacional, y se expresa como:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

El recíproco de la densidad es el volumen específico  $v$ , el cual se define como volumen por unidad de masa. Es decir,  $v=V/m=1/\rho$ . Para un elemento diferencial de volumen de masa  $\delta m$  y volumen  $\delta V$ , la densidad se puede expresar como  $\rho = \delta m/\delta V$ .

En general, la densidad de una sustancia depende de la temperatura y de la presión. La densidad de la mayoría de los gases es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura. Por otro lado, los líquidos y sólidos en esencia son sustancias incompresibles y la variación de su densidad con la presión suele ser despreciable [1].

### 3.2.2 Peso específico

Se define peso específico como el peso por unidad de volumen, sus unidades son newtons por metro cúbico ( $\text{N/m}^3$ ) en el Sistema Internacional, y se expresa como:

$$\gamma = \frac{w}{V} = \frac{m \cdot g}{V}$$

### 3.2.3 Compresibilidad

Se sabe que el volumen (o la densidad) de un fluido cambia respecto a una variación en su temperatura o su presión. Los fluidos suelen expandirse cuando se calientan o despresurizan, y se contraen cuando se enfrían o presurizan. Pero la cantidad del cambio de volumen es diferente para fluidos diferentes y se necesita definir las propiedades que relacionan los cambios en el volumen con los cambios en la presión y en la temperatura. Dos de esas propiedades son el módulo de elasticidad de volumen  $\kappa$  y el coeficiente de expansión volumétrica  $\beta$  [1].

Es común observar que un fluido se contrae cuando se aplica más presión sobre él, y se expande cuando se reduce la presión que actúa sobre él. Es decir, los fluidos actúan como sólidos elásticos respecto a la presión. Por lo tanto, de una manera análoga al módulo de elasticidad de Young de los sólidos, es apropiado definir un

coeficiente de compresibilidad  $\kappa$  (llamado también módulo de compresibilidad o módulo de elasticidad) para los fluidos como:

$$\kappa = -v \left( \frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = \rho \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T$$

Un valor grande de  $k$  indica que se necesita un cambio también grande en la presión para causar un pequeño cambio relativo en el volumen y, de este modo, un fluido con un  $k$  grande es en esencia incompresible. Esto es típico para los líquidos y explica por qué éstos suelen considerarse como incompresibles [1].

### 3.2.4 Número de Mach

Un parámetro importante en el análisis de flujo de fluidos compresibles es el número de Mach ( $Ma$ ), que recibe su nombre del físico austriaco Ernst Mach (1838-1916). Es la relación entre la velocidad real del fluido (o la de un objeto en el fluido en reposo) y la velocidad del sonido en el mismo fluido en el mismo estado:

$$Ma = \frac{V}{c}$$

El número de Mach depende de la velocidad del sonido, que a su vez depende del estado del fluido. Por lo tanto, el número de Mach de un automóvil que circula a una velocidad determinada constante puede ser diferente en distintas situaciones dependiendo de factores como la temperatura [1].

Los regímenes de fluido se describen a menudo en términos del número de Mach del flujo. El flujo se llama sónico cuando  $Ma=1$ , subsónico cuando  $Ma<1$ , supersónico cuando  $Ma>1$ , hipersónico cuando  $Ma \gg 1$ , y transónico cuando  $Ma \cong 1$ .

### 3.2.5 Viscosidad

La viscosidad refleja la resistencia del fluido a la velocidad de deformación y tiene un papel análogo al del rozamiento en el movimiento de los sólidos. La viscosidad está siempre presente en mayor o menor medida tanto en fluidos compresibles como incompresibles, pero no siempre es necesario tenerla en cuenta. La fuerza que un fluido fluyente ejerce sobre un cuerpo, en nuestro caso el automóvil, en la dirección del flujo se llama fuerza de arrastre, y la magnitud de ésta depende, en parte, de la viscosidad [1].

En el flujo unidimensional de fluidos newtonianos (agua, aire), el esfuerzo cortante se puede expresar mediante la relación lineal:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

donde la constante de proporcionalidad  $\mu$  se llama coeficiente de viscosidad o viscosidad dinámica (o absoluta) del fluido, cuya unidad es  $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ , o de modo equivalente,  $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ . Una unidad común de la viscosidad es el poise, el cual equivale a  $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  [1].

Una gráfica del esfuerzo cortante, en función de la razón de deformación (gradiente de velocidad) para un fluido newtoniano es una recta cuya pendiente es la viscosidad de ese fluido, como se muestra en la figura 9. La viscosidad es independiente de la razón de deformación. Como la tasa de deformación es proporcional al esfuerzo cortante, la figura 9 revela que la viscosidad es en realidad un coeficiente en una relación esfuerzo-deformación [1].

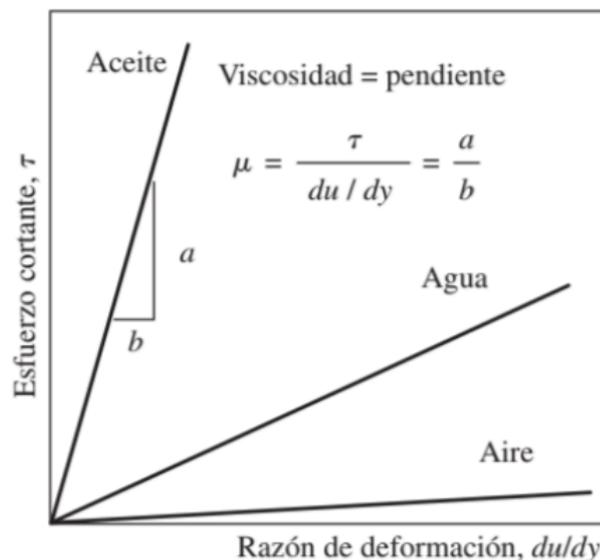


Figura 9. Relación esfuerzo-deformación de un fluido newtoniano [1]

En mecánica de fluidos y transferencia de calor, con frecuencia aparece la razón de la viscosidad dinámica a la densidad. Por conveniencia, a esta razón se le da el nombre de viscosidad cinemática  $\nu$  y se expresa como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

La viscosidad de un fluido es una medida de su “resistencia a la deformación”. La viscosidad se debe a la fuerza de fricción interna que se desarrolla entre las diferentes capas de los fluidos a medida que se obligan a moverse unas con relación a las otras [1].

La viscosidad dinámica de los fluidos gaseosos varía mucho con la temperatura, aumentando con ella, aunque siendo prácticamente independiente de la presión. Por el contrario, la viscosidad cinemática de los gases varía mucho con la presión y la temperatura. En un gas las fuerzas intermoleculares son despreciables y a temperaturas elevadas las moléculas de los gases se mueven en forma aleatoria a velocidades más altas. Esto conduce a que se produzcan más colisiones moleculares por unidad de volumen por unidad de tiempo y, en consecuencia, en una mayor resistencia al flujo. La viscosidad de los gases se expresa como función de la temperatura por la correlación de Sutherland (de The U. S. Standard Atmosphere) como:

$$\mu = \frac{\alpha T^{0.5}}{1 + b/T}$$

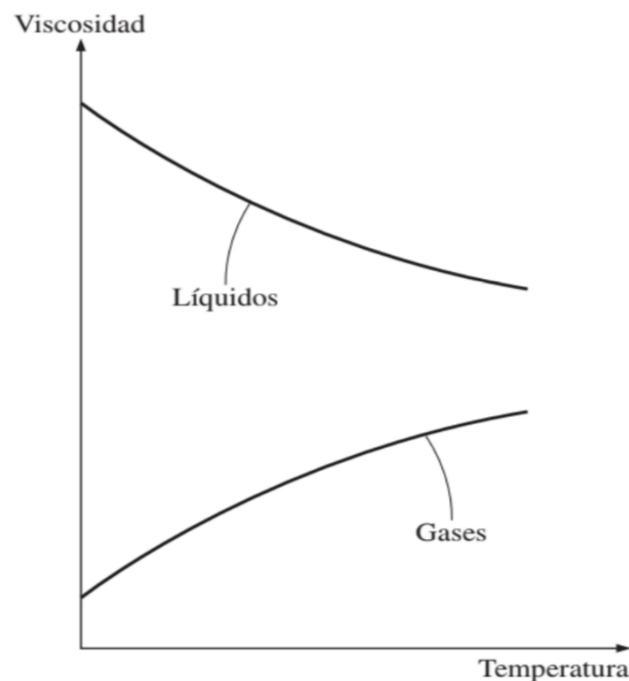


Figura 10. Relación viscosidad-temperatura de un fluido [1]

### 3.3 TIPOS DE FLUJO

El estudio del movimiento de un fluido en el interior de un contorno (tubería, canal) o alrededor de un contorno (coche, ala de avión, barco) es el problema central de la mecánica de fluidos. El movimiento de un sólido por muy complicado que sea siempre se descompone en el movimiento de traslación del centro de gravedad, y un movimiento de rotación alrededor de este. Sin embargo, el movimiento general de un fluido es infinitamente más complicado, debido al continuo desplazamiento de unas partículas respecto a otras. Por ello conviene distinguir los siguientes regímenes de corriente.

#### 3.3.1 Flujo viscoso y no-viscoso

Cuando dos capas de fluido se mueven una en relación con la otra, se desarrolla una fuerza de fricción entre ellas y la capa más lenta trata de desacelerar a la más rápida. Esta resistencia interna al flujo se cuantifica mediante la propiedad de viscosidad del fluido, la cual es una medida de la adherencia interna de éste [1].

La viscosidad es causada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas, en los líquidos, y por las colisiones moleculares en los gases. No existe fluido con viscosidad cero y, en consecuencia, en todos los flujos de fluidos intervienen los efectos viscosos en cierto grado. Los flujos donde los efectos de la fricción son significativos se llaman flujos viscosos. Pero, en muchos flujos de interés práctico, se tienen regiones (por lo general regiones no cercanas a superficies sólidas) en donde las fuerzas viscosas son despreciables en comparación con las fuerzas de inercia o de presión. Despreciar los términos viscosos en esas regiones de flujo no-viscosos simplifica mucho el análisis, sin pérdida considerable en la exactitud.

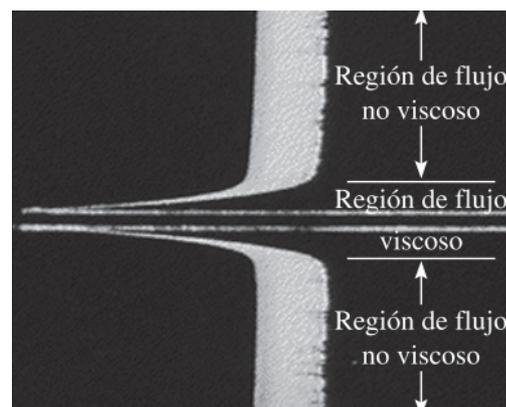


Figura 11. Corriente de fluido sobre una placa plana [1]

En la figura 11 se muestra el desarrollo de regiones viscosas y no-viscosas de flujo como resultado de la inserción de una placa plana paralela al flujo en una corriente de fluido de velocidad uniforme. El fluido se pega a la placa en ambos lados debido a la condición de no-deslizamiento y la delgada capa límite en la cual los efectos viscosos son significativos, cercana a la superficie de la placa es la región de flujo viscoso. La región de flujo en ambos lados, lejana a la placa y que no es afectada por la presencia de ésta es la región de flujo no-viscoso [1].

### **3.3.2 Flujo interno y externo**

Un flujo de un fluido se clasifica como interno o externo, dependiendo de si a ese fluido se le obliga a fluir en un canal confinado o sobre una superficie. El flujo de un fluido no limitado sobre una superficie es flujo externo. El flujo en un tubo o ducto es flujo interno si el fluido queda por completo limitado por las superficies sólidas. Por ejemplo, el flujo de agua en un tubo es flujo interno y el flujo de aire sobre una pelota o alrededor de un tubo expuesto durante un día de viento constante es flujo externo.

En nuestro caso trataremos con un flujo externo, que circulara alrededor del automóvil, en el cual los efectos viscosos quedaran limitados a la capa límite cercana a las superficies sólidas y a las regiones de la estela corriente abajo de los cuerpos [1].

### **3.3.3 Flujo compresible e incompresible**

Un flujo se clasifica como compresible o incompresible, dependiendo del nivel de variación de la densidad del fluido en ese flujo. La incompresibilidad es una aproximación y se dice que el flujo es incompresible si la densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo. Por lo tanto, el volumen de todas las porciones del fluido permanece inalterado sobre el curso de su movimiento cuando el flujo se modela como es incompresible [1].

### **3.3.4 Flujo laminar y turbulento**

Algunos flujos son suaves y ordenados en tanto que otros son considerados caóticos. El flujo laminar se caracteriza por estar perfectamente ordenado de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas o en capas cilíndricas, mientras que el flujo turbulento es caótico, las partículas se mueven desordenadamente y las

trayectorias se entrecruzan formando pequeños remolinos aperiódicos. El flujo que se encuentra entre ambos se denomina flujo de transición. Estos tres tipos de flujos se presentarán en nuestro modelado. [2].

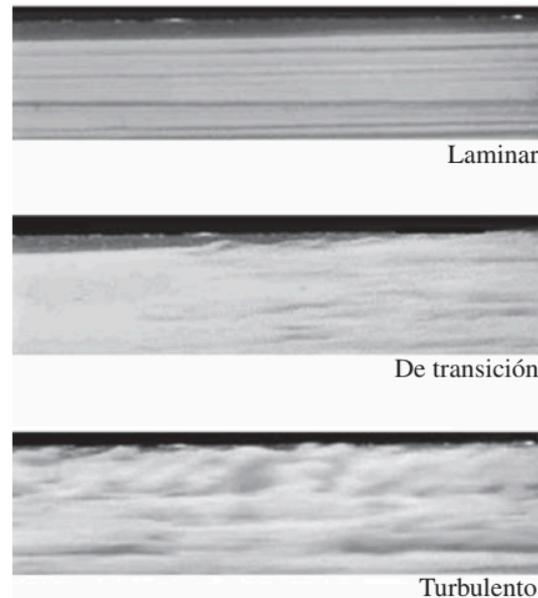


Figura 12. Ejemplo de flujo laminar y turbulento [1]

### 3.3.5 Flujo natural y forzado

Se dice que el flujo de un fluido es natural o forzado, dependiendo de cómo se inicia el movimiento de ese fluido. En el flujo forzado, un fluido se obliga a fluir sobre una superficie o en un tubo por medio de medios externos, como una bomba o un ventilador. En los flujos naturales, cualquier movimiento del fluido se debe a medios naturales, como el efecto de flotación, el cual se manifiesta como la elevación del fluido más caliente (por consiguiente, más ligero) y la caída del fluido más frío (por lo tanto, el más denso) [1].

## 3.4 CAPA LÍMITE

Existen diversos efectos difíciles de calcular y bastante complejos que ha de tenerse en cuenta para estudiar un fluido. Un efecto importante para el estudio es la capa límite. La capa límite es la zona de un fluido que debido a su movimiento es perturbado por la presencia de un sólido en contacto. La figura 13 representa una placa fija con borde de ataque afilado sumergida en una corriente de un fluido que circula a velocidad constante y paralela a la placa. La parte del fluido en contacto con la placa queda fija debido a la adherencia, y las capas sucesivas sufren un frenado.

A medida que la corriente avanza por la placa, mas capas del fluido quedan afectadas [1].

El espesor  $\delta$  de la capa limite representado en la figura 13 puede definirse como la distancia desde la superficie donde el gradiente de velocidad es cero, hasta llegar al punto de flujo principal en el borde exterior. La figura indica donde tiene lugar la transición, es decir, donde el flujo laminar se empieza a hacer inestable y comienza a desarrollarse la turbulencia en el interior de la capa limite, tambien muestra donde se hace francamente turbulenta, aumentando mas y mas corriente bajo el espesor dela misma [2].

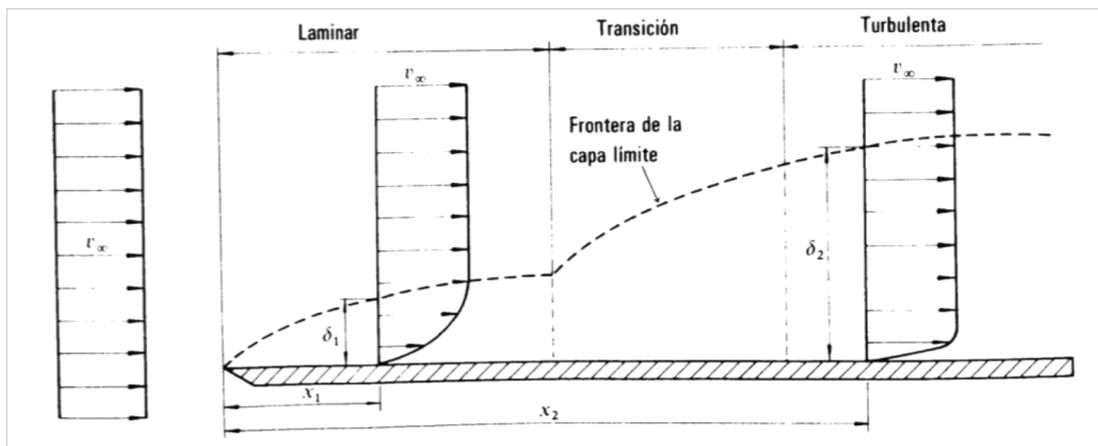


Figura 13. Espesor de la capa límite en una placa [2]

La importancia de la capa límite radica en que en ella exclusivamente es donde tienen lugar los fenómenos de la viscosidad. Aunque, por lógica, se pueda pensar que es más conveniente el flujo laminar, el flujo turbulento tiene ciertas ventajas respecto al flujo laminar; por lo tanto, ambos tipos de flujo deben estar presentes para un buen rendimiento aerodinámico [2].

En el caso de que las diferencias de velocidad producidas en las subcapas de la capa límite molesten a la capa límite, como por ejemplo la curvatura de la superficie de un cuerpo, ésta se convierte en turbulenta. Sin embargo, si son pequeñas, las subcapas deslizan unas sobre otras ocasionando una leve interacción entre ellas convirtiéndose en una capa límite laminar. En la capa límite, a medida que se avanza a lo largo de la superficie de un cuerpo, se incrementa su grosor pudiéndose iniciar como delgada y laminar en la parte delantera del cuerpo y logrando un incremento de

su grosor y volviéndose turbulenta en la parte trasera debido a las distorsiones producidas al atravesar el aire, ver Figura 13.

A veces, circular con flujo turbulento es una ventaja. La capa límite turbulenta hace que la energía cinética de la zona exterior se transmita al interior, provocando el avance de las zonas de menor velocidad, que ocasiona el retraso de la separación de flujo con el cuerpo o unir el flujo separado permitiendo obtener mayor carga aerodinámica y menor resistencia [7].

Como ejemplos de capa límite turbulenta se tiene la generación de vórtices en la superficie de un ala, dan mayor energía a la capa límite para evitar su separación, o los agujeros de una pelota de golf, al tener menor sección efectiva producen menor desprendimiento y, por lo tanto, menor resistencia ya que el aire se desvía menos para rodear el cuerpo [7].

### 3.4.1 Número de Reynolds

El número de Reynolds es el cociente entre la fuerza de inercia y el esfuerzo viscoso ejercido sobre el cuerpo de estudio. En el flujo laminar, este cociente es pequeño debido a viscosidad alta y velocidades bajas; sin embargo, en un flujo turbulento, el número de Reynolds es mayor debido a las altas velocidades y la baja viscosidad.

El tránsito de régimen laminar a régimen turbulento es un fenómeno que depende en gran medida de la viscosidad, y repercute en la resistencia de la placa, se verifica para un número determinado de Reynolds.

$$Re = \frac{v_{\infty} \cdot x}{\nu}$$

Desarrollando un poco más la expresión llegamos a la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{\infty} \cdot L_c}{\mu}$$

$v_{\infty}$ : velocidad del fluido imperturbado o velocidad en el infinito (m/s)

$L_c$ : longitud característica del sólido a estudio (m).

$\mu$ : viscosidad dinámica del fluido (Pa · s)

También será función del número de Reynolds el espesor  $\delta$  de la capa límite, es decir, expresando este espesor de forma adimensional:

$$\frac{\delta}{x} = f(Re)$$

Mediante diferentes estudios experimentales se ha podido determinar un valor crítico del número de Reynolds, es decir, un valor aproximado que hace de “frontera” entre el régimen laminar y el turbulento:

- $Re < 2000$ : Región laminar
- $2000 < Re < 4000$ : Región crítica
- $Re > 4000$ : Región turbulento

En números de Reynolds altos, interesa tener una mayor capa límite laminar para obtener un coeficiente de fricción más bajo porque, al pasar a una capa límite turbulenta manteniendo los mismos parámetros de estudio, el coeficiente de fricción aumenta notablemente provocando un aumento en la resistencia del aire [2].

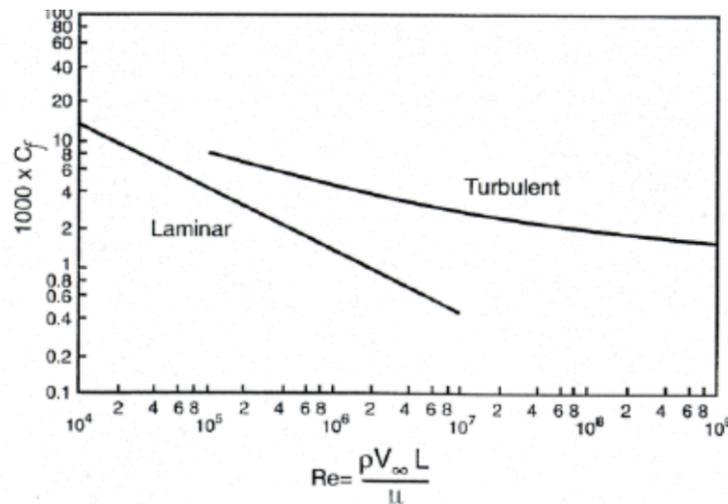


Figura 14. Coeficiente de presión en función del número de Reynolds en una placa plana [1]

### 3.4.2 Resistencia de forma

A medida que el flujo avanza sobre la superficie se puede dar lugar a una separación de la capa límite, originando así un gradiente de presiones adverso. Es lo que se conoce como resistencia de forma o desprendimiento de la capa límite y depende en gran medida de la forma del contorno del sólido en cuestión.

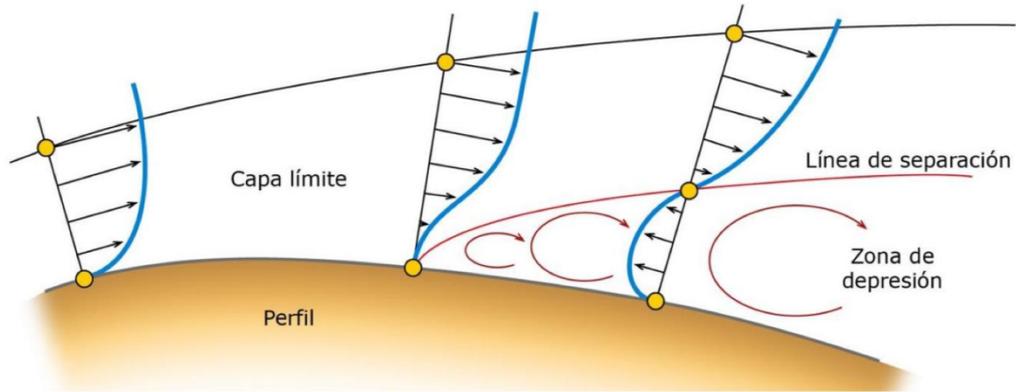


Figura 15. Desprendimiento de la capa límite [3]

Esto sucede cuando el flujo en las proximidades del contorno se va continuamente decelerando a causa de la viscosidad hasta que en cierto punto la velocidad es cero. La forma del contorno exigiría aun una disminución mayor de la velocidad, porque allí el contorno diverge, pero como esto es imposible el flujo se separa del contorno al mismo tiempo que se produce un contraflujo producido por el gradiente de presión adverso. En la parte inferior de la línea de desprendimiento se crea una zona de baja presión, mientras que en la zona superior la presión será más alta. El cuerpo sumergido en el fluido experimentara una fuerza  $F$  debida a este gradiente de presiones en la dirección del flujo [2].

En el caso de nuestra simulación de un automóvil supondremos que todas las paredes del modelo cumplen la condición de no deslizamiento.

### 3.5 ECUACIÓN DE BERNOULLI

La ecuación de Bernoulli es una relación aproximada entre la presión, la velocidad y la elevación, y es válida en regiones de flujo estacionario e incompresible en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables [1].

Considere el movimiento de una partícula de fluido en un campo de flujo estacionario. Cuando se aplica la segunda ley de Newton (la cual se define como la relación de conservación del momento lineal en la mecánica de fluidos) en la dirección  $s$ , sobre una partícula en movimiento a lo largo de una línea de corriente, da:

$$\sum F_s = m \cdot a_s$$

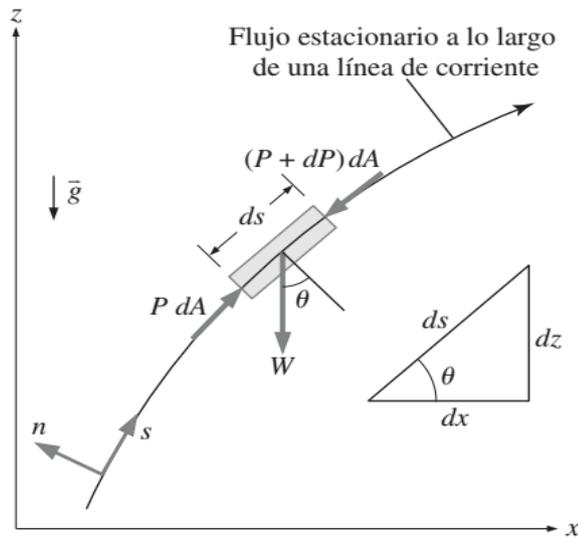


Figura 16. Fuerzas que actúan sobre una partícula a lo largo de una línea de corriente [1]

En regiones del flujo en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables, las fuerzas significativas que actúan en la dirección  $s$  son la presión (que actúa sobre ambos lados) y la componente del peso de la partícula en la dirección  $s$  (Figura 16). Por lo tanto, la ecuación anterior queda:

$$P dA - (P + dP) \cdot dA - W \cdot \text{sen}\theta = mV \cdot \frac{dV}{dS}$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre la normal a la línea de corriente y el eje vertical  $z$  en ese punto,  $m = rV = r \cdot dA \cdot ds$  es la masa,  $W = mg = rg \cdot dA \cdot ds$  es el peso de la partícula de fluido y  $\text{sen}\theta = dz/ds$ . Se sustituye:

$$-dP \cdot dA - \rho g \cdot dA \cdot ds \cdot \frac{dz}{ds} = \rho \cdot dA \cdot ds \cdot V \cdot \frac{dV}{dS}$$

Cuando se cancela  $dA$  de cada término y se simplifica,

$$-dP - \rho g \cdot dz = \rho \cdot V \cdot dV$$

Si se nota que  $V \cdot dV = \frac{1}{2} d(V^2)$  y se divide cada término entre  $r$ , da:

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} d(V^2) + g \cdot dz = 0$$

Integrando obtenemos:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constante a lo largo de una línea de corriente}$$

ya que los dos últimos términos son diferenciales exactas. En el caso del flujo incompresible, el primer término también se convierte en una diferencial exacta y su integración da:

Flujo estacionario e incompresible:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constante a lo largo de una línea}$$

Ésta es la famosa ecuación de Bernoulli, la cual tiene una amplia aplicación en mecánica de fluidos para el flujo estacionario e incompresible, a lo largo de una línea de corriente, en las regiones no viscosas del flujo [1].

El valor de la constante puede evaluarse en cualquier punto de la línea de corriente en donde se conozcan la presión, densidad, velocidad y elevación. La ecuación de Bernoulli también puede escribirse entre dos puntos cualesquiera sobre la misma línea de corriente como:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

La ecuación de Bernoulli expresa que, en el estacionario e incompresible, con fricción despreciable, las diversas formas de la energía mecánica se transforman entre sí, pero su suma permanece constante. En otras palabras, no se tiene disipación de energía mecánica en ese tipo de flujos, puesto que no existe fricción que convierta esa energía mecánica en energía térmica sensible (interna) [1].

La energía se transfiere a un sistema como trabajo cuando se aplica una fuerza a este sistema a lo largo de una distancia. Si se toma en cuenta la segunda ley de Newton del movimiento, la ecuación de Bernoulli también puede concebirse de la manera siguiente: el trabajo realizado por las fuerzas de presión y de gravedad sobre la partícula de fluido es igual al aumento en la energía cinética de esa partícula [1].

Debe tenerse cuidado cuando se utiliza la ecuación de Bernoulli, porque es una aproximación que sólo se aplica a las regiones no viscosas del flujo. En general, los efectos de la fricción siempre son importantes muy cerca de las paredes sólidas (capas límite) y directamente corriente abajo de los cuerpos (estelas). Por tanto, la aproximación de Bernoulli es útil por lo general en regiones del flujo por fuera de las

capas límite y estelas, en donde el movimiento del fluido lo rigen los efectos combinados de la presión y la gravedad [1].

La ecuación de Bernoulli determina que la suma de la energía de flujo, la cinética y la potencial de una partícula de fluido a lo largo de una línea de corriente es constante. Por lo que la energía cinética y la potencial puede transformarse a energía de flujo (y viceversa) en un flujo, lo cual hace que cambie la presión. Este fenómeno puede hacerse más visible cuando se multiplica la ecuación de Bernoulli por la densidad  $\rho$ :

$$P + \rho \frac{V^2}{2} + \rho g z = \text{constante a lo largo de una línea}$$

- $P$ : es la presión estática (no incorpora efectos dinámicos); representa la presión termodinámica real del fluido. Ésta es la misma que la presión usada en la termodinámica y las tablas de propiedades.
- $\rho \frac{V^2}{2}$ : es la presión dinámica, representa el aumento en la presión cuando el fluido en movimiento se detiene de manera isotrópica.
- $\rho g z$ : es la presión hidrostática, la cual no es presión en un sentido real, porque su valor depende del nivel de referencia seleccionado; toma en cuenta los efectos de elevación, es decir, del peso del fluido sobre la presión [1].

### 3.6 CINEMÁTICA DE FLUIDOS

La materia llamada cinemática se interesa en el estudio del movimiento. En la mecánica de fluidos, la cinemática de fluidos es el estudio que explica cómo fluyen los fluidos y cómo describir su movimiento. Desde un punto de vista fundamental existen dos maneras de describir el movimiento [1].

El primer método y más conocido es el que se aprendió en las clases de física: seguir la trayectoria de los objetos por separado. Este método se denomina descripción lagrangiana, y requiere conocer en cada instante los vectores posición y velocidad de las partículas [1].

El método más común de descripción del flujo de fluidos es la descripción euleriana del movimiento de fluidos, nombrada así en honor al matemático suizo

Leonhard Euler (1707-1783). En esta descripción del flujo de fluidos, se define un volumen de control, en torno al que el fluido circula. Posteriormente, se definen variables directamente dependientes del espacio y el tiempo, dentro del volumen de control. Por ejemplo, los campos de presión y velocidad son campos de variable escalar y vectorial respectivamente; en caso general para un flujo tridimensional no-estacionario, en coordenadas cartesianas:

$$P = P(x, y, z, t)$$

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$$

De manera colectiva, estas variables de campo (y otras) definen el campo de flujo:

$$\vec{V} = (u, v, w) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k}$$

Un caso práctico para intentar comprender la diferencia entre ambos métodos sería imaginar a una persona que quiere medir los parámetros de un río. En el enfoque lagrangiano, lanza al río una sonda que se desplaza corriente abajo con el agua. En el euleriano, ancla la sonda en una posición fija en el agua [1].

Aun cuando existen muchas ocasiones en las que la descripción lagrangiana resulta útil, con frecuencia la euleriana es más conveniente para las aplicaciones de la mecánica de fluidos. Además, en general, las mediciones experimentales se ajustan más a la descripción euleriana. Por ejemplo, en un túnel de viento, por lo general se colocan las sondas de velocidad y de presión en una ubicación fija en el flujo, midiendo  $P = P(x, y, z, t)$  o  $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$  [1].

### 3.6.1 Campo de aceleraciones

Las ecuaciones del movimiento para el flujo de fluidos (como la segunda ley de Newton) se escriben para una partícula de fluido, a la cual se le da el nombre de partícula material. Si fuera a seguirse una partícula particular de fluido conforme se desplaza en todas direcciones en el flujo, se estaría empleando la descripción lagrangiana y las ecuaciones del movimiento serían directamente aplicables. Por ejemplo, se definiría la ubicación de la partícula en el espacio en términos de un vector de posición material ( $x_{particula}(t)$ ,  $y_{particula}(t)$ ,  $z_{particula}(t)$ ). Sin embargo, se necesita algo de manipulación matemática para convertir las ecuaciones del movimiento en formas

aplicables para la descripción euleriana. Por ejemplo, considérese la segunda ley de Newton aplicada a la partícula mencionada:

$$\vec{F}_{particula} = m_{particula} \cdot \vec{a}_{particula}$$

Por definición, la aceleración de la partícula de fluido es la derivada respecto al tiempo de la velocidad:

$$\vec{a}_{particula} = \frac{d\vec{V}_{particula}}{dt}$$

Aplicando ahora la expresión de la velocidad de una partícula y desarrollando obtendremos:

$$\vec{a}_{particula} = \frac{d\vec{V}_{particula}}{dt} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d\vec{V}(x_{particula}, y_{particula}, z_{particula}, t)}{dt}$$

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \frac{dt}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial x_{particula}} \frac{dx_{particula}}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial y_{particula}} \frac{dy_{particula}}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial z_{particula}} \frac{dz_{particula}}{dt}$$

Puesto que la aceleración está definida como la que corresponde a una partícula de fluido (descripción lagrangiana), la razón de cambio de la posición x de la partícula respecto al tiempo es  $dx_{particula}/dt = u$ , en donde u es la componente x del vector de velocidad definido por la ecuación. De manera análoga  $dy_{particula}/dt = v$  y  $dz_{particula}/dt = w$ . La aceleración quedara:

$$\vec{a}_{particula}(x, y, z, t) = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}$$

En cualquier instante t, el campo de aceleración debe ser igual a la aceleración de la partícula de fluido que llegue a ocupar la ubicación (x, y, z) en ese instante t, ya que, por definición, la partícula de fluido se está acelerando con el flujo del fluido. Realizamos la transformación del marco de referencia lagrangiano al euleriano, y definimos la aceleración de una partícula de fluido expresada como una variable de campo:

$$\vec{a}(x, y, z, t) = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{V}$$

Como podemos ver la expresión de la aceleración consta de dos términos: el primero se llama aceleración local y es diferente de cero sólo para los flujos no

estacionarios, y el segundo término que recibe el nombre de aceleración convectiva, puede ser diferente de cero inclusive para los flujos estacionarios [1].

### 3.6.2 Teorema del transporte de Reynolds

En la dinámica de fluidos es común que se trabaje con un volumen de control, el cual se define como una región en el espacio elegida para su estudio. El tamaño y la forma de un sistema pueden cambiar durante un proceso, pero nada de masa cruza sus límites (es decir, la frontera del sistema). Por otra parte, en un volumen de control se permite que la masa entre o salga a través de sus límites, los cuales se conocen como superficies de control. Un volumen de control también puede moverse y deformarse durante un proceso, pero numerosas aplicaciones del mundo real se relacionan con volúmenes de control fijos e indeformables [1].

La relación entre las razones de cambio respecto del tiempo de una propiedad extensiva para un sistema y para un volumen de control se expresa por el teorema del transporte de Reynolds (RTT, Reynolds transport theorem), el cual proporciona el vínculo entre los enfoques de sistema y de volumen de control [1].

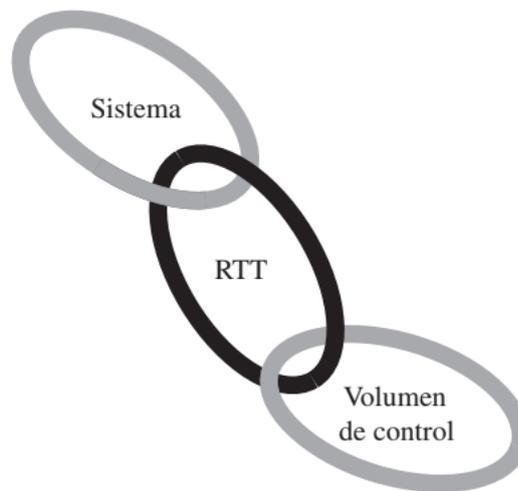


Figura 17. Teorema del transporte de Reynolds [1]

El teorema de transporte de Reynolds relaciona la derivada Lagrangiana de una integral de volumen de un sistema, con una integral en derivadas Eulerianas.

$$\frac{dB_{sist}}{dt} = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (\rho b) dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

### 3.6.3 Vorticidad

En tres dimensiones se debe definir un vector para la razón de rotación en un punto en el flujo, ya que su magnitud puede diferir en cada una de las tres dimensiones. El vector de razón de rotación es igual al vector de velocidad angular y se expresa en coordenadas cartesianas como:

$$\vec{w} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \vec{i} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \vec{j} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k}$$

Una propiedad cinemática relacionada tiene gran importancia para el análisis de los flujos de fluidos es el vector de vorticidad, que se define matemáticamente como el rotacional del vector de velocidad  $\vec{V}$ :

$$\vec{\zeta} = \vec{\nabla} \times \vec{V} = \text{rot}(\vec{V})$$

Aplicando la ecuación anterior, podemos definir una nueva expresión para el vector de razón de rotación:

$$\vec{w} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} \times \vec{V} = \frac{1}{2} \text{rot}(\vec{V}) = \frac{\vec{\zeta}}{2}$$

Por lo tanto, podemos afirmar que la vorticidad es igual al doble de la velocidad angular de una partícula de fluido.

Si la vorticidad en un punto en un campo de flujo es diferente de cero, la partícula de fluido que llegue a ocupar ese punto en el espacio está girando; se dice que el flujo en esa región es rotacional. De modo semejante, si la vorticidad en una región del flujo es cero (o despreciablemente pequeña) las partículas de fluido allí no están girando; se dice que el flujo en esa región es irrotacional. Desde el punto de vista físico, las partículas de fluido que están en una región rotacional de un flujo giran a medida que avanzan en ese flujo. Por ejemplo, las partículas de fluido dentro de la capa límite viscosa cercana a una pared sólida son rotacionales (y, por lo tanto, tienen vorticidad diferente de cero), en tanto que las partículas de fluido que están afuera de la capa límite son irrotacionales (y su vorticidad es cero) [1].

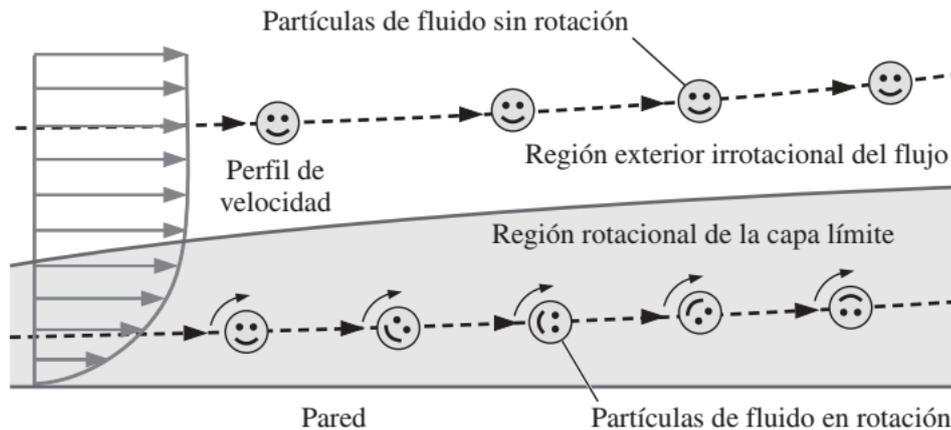


Figura 18. Flujo rotacional [1]

La vorticidad de un elemento de fluido no puede cambiar, excepto por la acción de la viscosidad, el calentamiento no uniforme (gradientes de temperatura) u otros fenómenos no uniformes. Por consiguiente, si un flujo se origina en una región irrotacional, continúa siendo irrotacional hasta que algún proceso no uniforme lo altera [1].

### 3.7 TURBULENCIA

Existen dos métodos fundamentales para diseñar y analizar sistemas de ingeniería relacionados con el flujo de fluidos: experimentación y cálculo. El primero conlleva, por lo general, la construcción de modelos que son probados en túneles de viento u otras instalaciones, mientras que el segundo implica resolver ecuaciones diferenciales, ya sea de manera analítica o computacional. En nuestro caso particular, aplicaremos la dinámica de fluidos computacional (CFD) [1].

Las simulaciones de flujo turbulento son mucho más difíciles que las de flujo laminar, inclusive para casos donde el campo de flujo es estacionario en promedio. La razón es que en la consideración más detallada el campo de flujo turbulento siempre es no estacionario y tridimensional; las estructuras vorticiales aleatorias, de movimiento giratorio, llamadas remolinos de turbulencia, surgen de todas las orientaciones en un flujo turbulento [1].

Los cálculos mediante CFD emplean una técnica llamada simulación numérica directa (SND), donde se intenta resolver el movimiento no estacionario de todas las escalas del flujo turbulento. Sin embargo, las diferencias en tamaño y en escala de tiempo entre los remolinos mayor y menor pueden ser de varios órdenes de magnitud.

Además, los cálculos de SND de flujo turbulento resultan más difíciles a medida que aumenta el número de Reynolds. Las soluciones de SND demandan mallas tridimensionales muy finas, computadoras grandes y una enorme cantidad de tiempo del CPU. Con las computadoras actuales, los resultados de SND no son factibles [1].

Por lo tanto, es necesario hacer algunas suposiciones que permitan simplificar con el fin de simular campos complejos de flujo turbulento con número de Reynolds alto. El siguiente nivel abajo de la SND es la simulación de remolinos grandes (SRG). Con esta técnica se obtienen a la escala grande las características no estacionarias de los remolinos turbulentos, mientras que se modelan los remolinos turbulentos disipativos de pequeña escala. La suposición básica es que los remolinos turbulentos más pequeños son isotrópicos; es decir, se supone que los remolinos pequeños son independientes de la orientación de sistema de coordenadas y siempre se comportan de manera estadísticamente similar y predecible, cualquiera que sea el campo de flujo turbulento. En comparación con SND, SRG demanda una cantidad de los recursos computacionales considerablemente menores porque se elimina la necesidad de resolver los remolinos más pequeños presentes en el campo de flujo [1].

El siguiente nivel de decreciente complejidad es modelar todos los remolinos turbulentos no estacionarios con alguna clase de modelo de turbulencia. No se hace algún intento por resolver las características no estacionarias de los remolinos turbulentos de ninguna escala, ni inclusive los más grandes. Por sencillez, se considera sólo el flujo incompresible estacionario. Cuando se usa un modelo de turbulencia, la ecuación de Navier-Stokes se reemplaza por lo que se llama ecuación de Navier-Stokes de número de Reynolds pro-medio (NSRP), que se muestra aquí para flujo turbulento, incompresible, estacionario:

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot (\tau_{ij,turbulento})$$

Del mismo modo, es importante conocer la expresión del tensor de esfuerzo específico de Reynolds, denominado así debido a que actúa de modo similar al tensor de esfuerzo viscoso.

$$\tau_{ij,turbulento} = \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$

La barra superior indica el promedio en tiempo del producto de dos componentes de velocidad fluctuantes y los apóstrofos denotan componentes de velocidad fluctuantes [1].

Existen numerosos modelos de turbulencia que se emplean en la actualidad, entre otros: los modelos algebraicos, de una ecuación, de dos ecuaciones y el de esfuerzo de Reynolds. Tres de los modelos de turbulencia más populares son el modelo  $k-\varepsilon$ , el modelo  $k-\omega$  y el modelo  $q-\omega$ . Éstos denominados modelos de turbulencia añaden dos ecuaciones más a la formulación matemática del problema, que deben resolverse de manera simultánea con las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento lineal (y también de la energía si se está utilizando esta ecuación también). Junto con las dos ecuaciones adicionales que deben resolverse cuando se usa un modelo de turbulencia de dos ecuaciones, es necesario especificar otras dos condiciones de frontera para las propiedades de turbulencia en entradas y salidas del dominio computacional.

Resumiendo, un poco los conceptos anteriormente planteados, el estado actual de la dinámica de fluidos computacional es éste: puede manejar flujos laminares con facilidad, pero los flujos turbulentos de interés práctico son imposibles de resolver sin tener que recurrir a los modelos de turbulencia. Por desgracia, ningún modelo de turbulencia es universal, y una solución de la CFD de flujo turbulento es tan buena dependiendo qué tan apropiado es el modelo de turbulencia aplicado. Pese a esta limitación, los modelos de turbulencia estándares producen resultados razonables para muchos problemas de ingeniería prácticos [1].

A continuación, vamos a desarrollar brevemente los principales modelos de turbulencia que podríamos emplear en nuestro problema, para posteriormente seleccionar el que más se adecue a las características de nuestra simulación mediante CFD.

### **3.7.1 Modelo de Spalart-Allmaras**

El modelo de Spalart-Allmaras consta de una sola ecuación que resuelve una ecuación de transporte de la viscosidad cinemática turbulenta. Este modelo está enfocado al ámbito aeroespacial, y en concreto para casos que involucran flujos limitados por el sólido y se ha demostrado que da buenos resultados para capas límite

sujetas a gradientes de presión adversos. También está ganando popularidad en aplicaciones de turbomaquinaria [5].

Originariamente, este modelo es efectivo para números de Reynolds no muy elevado, además requiere que se resuelva previamente la región de la capa límite afectada por la viscosidad.

El modelo Spalart-Allmaras fue desarrollado principalmente para flujos aerodinámicos. No está calibrado para flujos industriales comunes, por lo que produce errores relativamente mayores para algunos flujos de corte libre, especialmente flujos planos y circulares. Además, no es válido para predecir la descomposición de las turbulencias isotrópicas homogéneas [5].

La variable de transporte en el modelo Spalart-Allmaras,  $\tilde{\nu}$ , es idéntica a la viscosidad cinemática turbulenta, excepto en la región cercana a la pared (afectada por la viscosidad). La ecuación de transporte para  $\tilde{\nu}$  es:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2}\rho \left( \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_{\tilde{\nu}}$$

Donde  $G_\nu$  es la producción de la viscosidad turbulenta, y  $Y_\nu$  es la destrucción de la viscosidad que acontece en la región próxima a la pared debido a la amortiguación viscosa.  $S_{\tilde{\nu}}$  es una variable definida por el usuario [5].

### 3.7.2 Modelo k- $\epsilon$ standard

Los modelos de turbulencia de dos ecuaciones permiten la determinación de dos parámetros, una longitud turbulenta y una escala de tiempo al resolver dos ecuaciones de transporte separadas. El modelo k- $\epsilon$  estándar pertenece a esta clase de modelos y se ha convertido en el caballo de batalla de los cálculos prácticos de flujo de ingeniería en el tiempo desde que fue propuesto por Launder y Spalding.

La robustez, la economía y la precisión razonable para una amplia gama de flujos turbulentos explican su popularidad en las simulaciones de flujo industrial y transferencia de calor. Es un modelo semi-empírico, y la derivación de las ecuaciones del modelo se basa en consideraciones experimentales y el empirismo.

El modelo estándar es un modelo basado en ecuaciones de transporte modelo para la energía cinética de turbulencia (k) y su tasa de disipación ( $\epsilon$ ). La ecuación de

transporte modelo para  $k$  se deriva de la ecuación exacta, mientras que la ecuación de transporte modelo para  $\varepsilon$  se obtuvo usando razonamiento físico y tiene poca semejanza con su equivalente matemático.

En la derivación del modelo  $k$ - $\varepsilon$ , se supone que el flujo es completamente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son insignificantes. Por lo tanto, el modelo estándar es válido solo para flujos totalmente turbulentos.

Las ecuaciones de este modelo que describen el comportamiento de la energía cinética de turbulencia ( $k$ ) y su tasa de disipación ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

A medida que se han ido descubriendo las fortalezas y debilidades del modelo estándar, se han introducido modificaciones para mejorar su rendimiento. Dos de estas variantes las estudiaremos a continuación: el modelo RNG y el modelo realizable [5].

### 3.7.3 Modelo RNG $k$ - $\varepsilon$

Como acabamos de indicar este modelo es un desarrollo del modelo estándar, concretamente el modelo RNG se derivó utilizando una técnica estadística llamada teoría del grupo de renormalización. Es similar en forma al modelo estándar, pero incluye las siguientes mejoras:

- El modelo RNG tiene un término adicional en su ecuación que mejora la precisión de los flujos rápidamente deformados.
- El efecto del remolino en la turbulencia se incluye en el modelo RNG, lo que mejora la precisión de los flujos de remolino.
- La teoría RNG proporciona una fórmula analítica para los números turbulentos de Prandtl, mientras que el modelo estándar utiliza valores constantes especificados por el usuario.
- Mientras que el modelo estándar es un modelo de alto número de Reynolds, la teoría RNG proporciona una fórmula diferencial derivada analíticamente para

una viscosidad efectiva que explica los efectos de bajo número de Reynolds. Sin embargo, el uso efectivo de esta característica depende de un tratamiento apropiado de la región cercana a la pared.

El modelo de turbulencia basado en RNG se deriva de las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes, utilizando una técnica matemática llamada métodos de "grupo de renormalización" (RNG). La derivación analítica da como resultado un modelo con constantes diferentes de las del modelo estándar, y términos y funciones adicionales en las ecuaciones de transporte para  $k$  y  $\varepsilon$ .

Estas características hacen que el modelo RNG sea más preciso y adecuado para una clase de flujos más amplia que el modelo estándar [5].

Las ecuaciones de este modelo que describen el comportamiento de la energía cinética de turbulencia ( $k$ ) y su tasa de disipación ( $\varepsilon$ ) son similares a las del modelo estándar:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon$$

### 3.7.4 Modelo k- $\varepsilon$ realizable

Al igual que el modelo RNG, este también resulta del desarrollo del modelo estándar, pero se caracteriza por dos importantes factores:

- El modelo realizable k- $\varepsilon$  contiene una formulación alternativa para la viscosidad turbulenta.
- Una ecuación de transporte modificada para la tasa de disipación,  $\varepsilon$ , se ha derivado de una ecuación exacta para el transporte de la fluctuación de vorticidad cuadrática media.

Las ecuaciones de este modelo que describen el comportamiento de la energía cinética de turbulencia ( $k$ ) y su tasa de disipación ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_e$$

Donde,  $G_k$  representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media,  $G_b$  es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad,  $Y_M$  denota la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible dentro de la tasa de disipación global.  $C_2$  y  $C_{1\varepsilon}$  son constantes.  $\sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  son los números de Prandtl de la turbulencia para los valores de  $k$  y  $\varepsilon$ .  $S_k$  y  $S_\varepsilon$  son constantes definidas por el usuario.  $C_1$ ,  $\nu$  y  $S$  son parámetros dependientes de otros más complejos del flujo. Finalmente,  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta, es un parámetro importante porque relaciona ambas ecuaciones del modelo.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}$$

Como veremos más adelante en el apartado correspondiente a la simulación aerodinámica mediante CFD, este será el modelo que escogeremos en nuestro proceso, debido a que ofrece ventajas en la resolución del flujo circular que se nos presentará en nuestro automóvil, además de contar con todas las características del modelo estándar. Para su aplicación práctica deberemos definir previamente dos variables: la intensidad de turbulencia ( $I$ ), se define como la relación entre la media cuadrática de las fluctuaciones de velocidad y la velocidad media del flujo, y la tasa de viscosidad turbulenta ( $\mu_t/\mu$ ) [5].

## 3.8 GRÁFICAS DE FLUJO

Una de las principales finalidades de este proyecto será analizar las diversas graficas de flujo (velocidad, presión, turbulencia...) tras la simulación mediante CFD del túnel de viento aplicado a nuestros automóviles. Es por esto que a continuación describiremos los diferentes tipos de graficas que posteriormente examinaremos.

### 3.8.1 Gráficas de perfiles

Una gráfica de perfiles indica cómo varía el valor de una propiedad escalar a lo largo de una dirección deseada en el campo de flujo. En la mecánica de fluidos se pueden crear gráficas de perfiles de cualquier variable escalar (presión, temperatura, densidad, etcétera), pero la más común es la gráfica del perfil de velocidad [1].

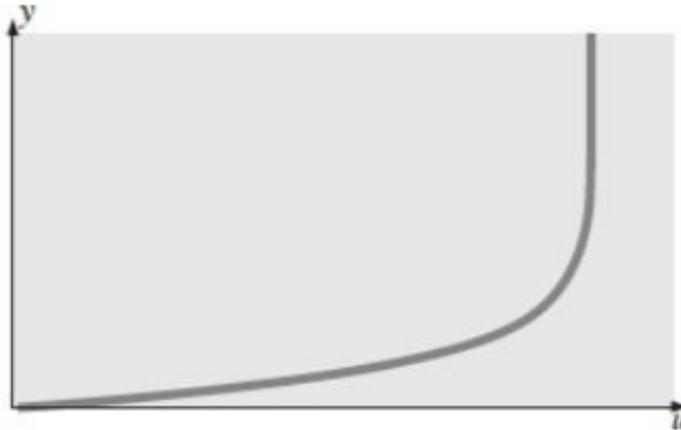


Figura 19. Ejemplo de gráfica del perfil de velocidad [1]

### 3.8.2 Gráficas vectoriales

Una gráfica vectorial es un patrón de flechas que indican la magnitud y dirección de una propiedad vectorial en un instante en el tiempo. En tanto que las líneas de corriente indican la dirección del campo de velocidad instantánea, no indican de manera directa la magnitud de la velocidad (la rapidez). Por lo tanto, se trata de un patrón útil de flujo, tanto para los flujos experimentales como computacionales de fluidos [1].

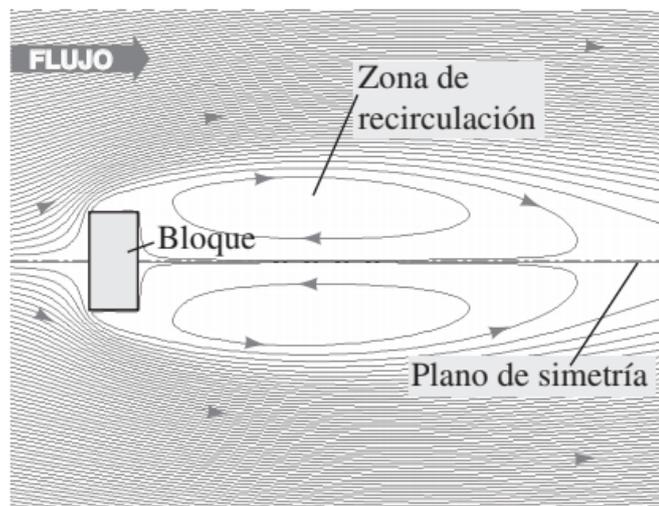


Figura 20. Ejemplo de gráfica vectorial [1]

### 3.8.3 Gráficas de contorno

Una gráfica de contornos muestra las curvas de valor constante de una propiedad escalar (o magnitud de una propiedad vectorial) en un instante determinado. En la mecánica de fluidos se aplica el mismo principio a varias propiedades escalares del flujo; se generan gráficas de contornos (también conocidas

como gráficas de isocontornos) de la presión, la temperatura, la magnitud de la velocidad, la concentración de especies, las propiedades de turbulencia, etcétera. Una gráfica de contornos puede revelar con rapidez las regiones de valores altos (o bajos) de la propiedad del flujo que se está estudiando. Este tipo de graficas tiene una ventaja respecto a las demás, que es su claridad visual [1].

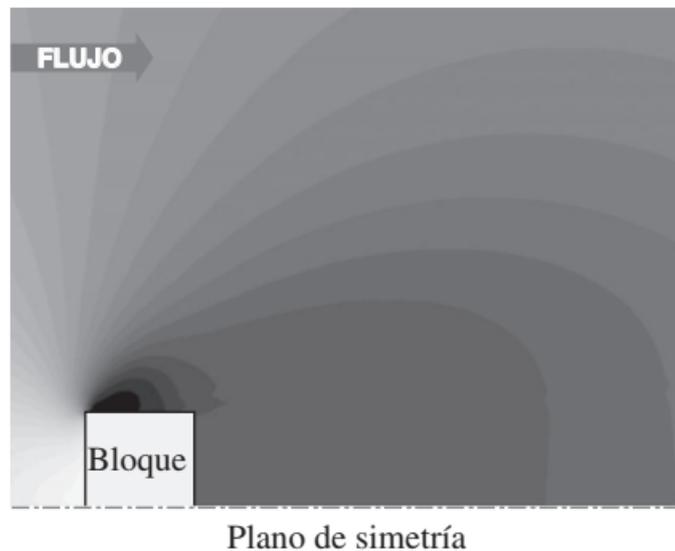


Figura 21. Ejemplo de gráfica de contorno [1]

### 3.9 AERODINÁMICA

Cuando un fluido se mueve sobre un cuerpo sólido, ejerce fuerzas de presión normales a la superficie, y fuerzas cortantes paralelas a la superficie del cuerpo. Es importante conocer la resultante de las fuerzas de presión y las fuerzas cortantes que actúan sobre el cuerpo, más que los detalles de las distribuciones de estas fuerzas por toda la superficie del cuerpo. La componente resultante de la presión y las fuerzas cortantes que actúa en la dirección del flujo se llama fuerza de arrastre (o simplemente arrastre), y la componente que actúa en dirección normal a la del flujo se llama fuerza de sustentación (o simplemente sustentación) [1].

En consecuencia, el desarrollo de una adecuada comprensión de flujo externo es importante en el diseño de numerosos sistemas de ingeniería como aeronaves, automóviles, edificios, barcos, submarinos y todo tipo de turbinas. Centrándonos en el caso de los automóviles de último modelo se han diseñado con énfasis en la aerodinámica. Usualmente, el arrastre es un efecto indeseable, como la fricción, y siempre se hace el mejor esfuerzo por eliminarlo, esto ha resultado en reducciones

considerables en el consumo de combustible y el ruido, y notable mejoría en el manejo [1].

En primer lugar, debemos fijar algunos de los conceptos desarrollados en apartados anteriores. El flujo sobre nuestro automóvil no se puede modelar como bidimensional o axisimétrico, sino que es tridimensional. Así mismo también podemos afirmar que el flujo puede clasificarse como incompresible ( $Ma < 0.3$ ), ya que nuestro automóvil circulara a 120 km/h, y por tanto muy lejos de la velocidad del sonido.

Por otro lado, los cuerpos sometidos a flujo de fluidos se clasifican como currentilíneos o romos, dependiendo de su forma global. Se dice que un cuerpo es currentilíneo o aerodinámico si se hace un esfuerzo conciso por alinear su forma con las líneas de corriente anticipadas en el flujo, como es el caso de los coches [1].

### 3.9.1 Fuerzas de arrastre y sustentación

Como acabamos de enunciar en el punto anterior, cuando un cuerpo se sumerge dentro de una corriente de cualquier fluido, estará sometido una serie de fuerzas y momentos del propio fluido, en la figura 22 tenemos un esquema de estos esfuerzos. Las fuerzas más importantes que tendremos en cuenta en nuestro proyecto son las de arrastre ( $F_D$ ) y sustentación ( $F_L$ ). Cuando los cuerpos tienen simetría respecto a los ejes de resistencia y sustentación como sucede, por ejemplo, en los aviones, barcos y vehículos, y además se desplazan en la dirección del aire, la fuerza lateral, o transversal ( $F_T$ ), se compensa a ambos lados del cuerpo y, por este motivo la consideraremos despreciable [1].

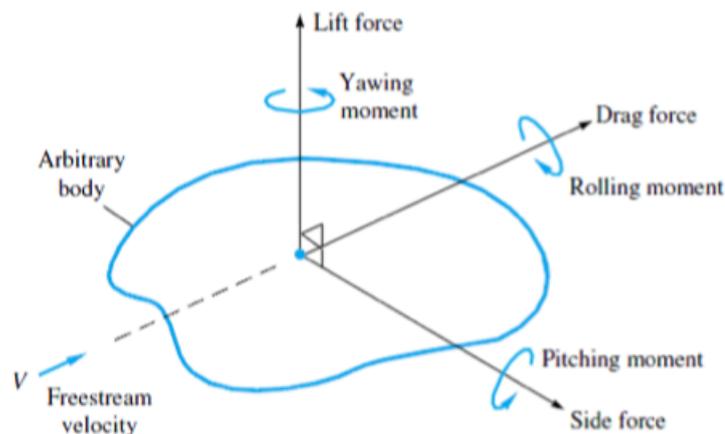


Figura 22. Fuerzas y momentos que actúan sobre un cuerpo sumergido en un fluido [8]

Las fuerzas de fluido también generan momentos que hacen que el cuerpo rote. El momento alrededor de la dirección del flujo se llama momento de balanceo (rolling moment), el momento alrededor de la dirección de sustentación se llama momento de guiñada (yawing moment), y el momento alrededor de la dirección de fuerza lateral se llama momento de cabeceo (pitching moment). Para cuerpos que tienen simetría en torno al plano sustentación-arrastre como los automóviles el momento de guiñada y el de balanceo, promediados en tiempo, son cero cuando el flujo está alineado con el cuerpo. Lo que permanece para estos cuerpos son las fuerzas de arrastre y sustentación y el momento de cabeceo [1].

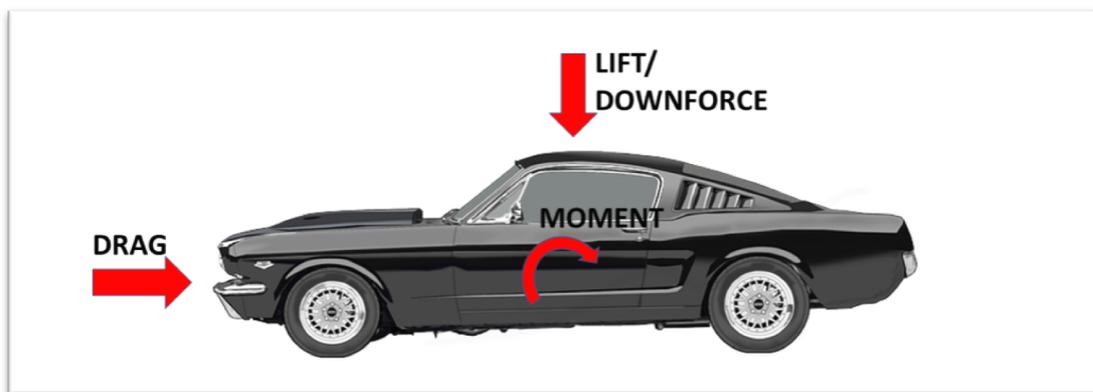


Figura 23. Representación gráfica de las fuerzas de arrastre y sustentación sobre un coche

Un fluido en reposo ejerce sólo fuerza de presión normal sobre la superficie de un cuerpo sumergido en él. Sin embargo, un fluido en movimiento también ejerce fuerzas de corte tangenciales sobre la superficie debido a la condición de no-deslizamiento provocada por efectos viscosos. En general, ambas fuerzas tienen componentes en la dirección del flujo, y por lo tanto la fuerza de arrastre se debe a los efectos combinados de la presión y las fuerzas de corte en la dirección del flujo. Las componentes de la presión y las fuerzas de corte en la dirección normal al flujo tienden a mover el cuerpo en dicha dirección; su suma se llama sustentación. Ambas fuerzas tienen su punto de actuación en el centro de presiones o aerodinámico del vehículo [1].

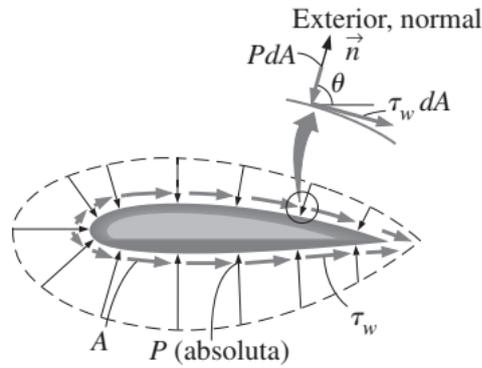


Figura 24. Fuerzas de presión y viscosas sobre un cuerpo bidimensional [1]

A continuación, estudiaremos el volumen de control de la figura 23, donde la presión y las fuerzas de corte que actúan sobre un área diferencial  $dA$  de la superficie son:  $PdA$  y  $\tau_w dA$ , respectivamente. Las expresiones que definen las fuerzas de arrastre y de sustentación que actúan en flujo bidimensional son:

$$F_D = \int_A dF_D = \int_A (-P \cos\theta + \tau_w \sin\theta) dA$$

$$F_L = \int_A dF_L = \int_A (-P \sin\theta + \tau_w \cos\theta) dA$$

Sin embargo, en nuestro caso estas ecuaciones no son válidas ya que no estamos ante un problema de flujo bidimensional sino tridimensional. Las fuerzas de arrastre y sustentación dependerán de la densidad  $\rho$  del fluido, la velocidad corriente arriba  $V$  y el tamaño, forma y orientación del cuerpo. Por consiguiente, nosotros deberemos obtener ambas fuerzas tras la obtención experimental de los valores de los coeficientes adimensionales de arrastre  $C_D$  y sustentación  $C_L$ . Las ecuaciones que relacionan estos parámetros vienen dadas por:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

Donde  $A$  hace referencia al área frontal del cuerpo, en este caso nuestro automóvil, es decir, el área proyectada sobre un plano normal a la dirección de la corriente del fluido. Los coeficientes de arrastre y sustentación locales varían a lo

largo de la superficie como resultado de los cambios en la capa límite de velocidad en la dirección del flujo. Existe interés en las fuerzas de arrastre y sustentación para toda la superficie que debe determinarse con los coeficientes promedio de arrastre y sustentación [1].

Otro aspecto que debemos tener en cuenta a la hora de diseñar nuestro modelo de automóvil es el ángulo de ataque de su carrocería, debido a que este tiene una influencia directa en el valor del coeficiente de arrastre. El ángulo de ataque esta formado por la dirección del flujo y la inclinación de salida de la carrocería [1].

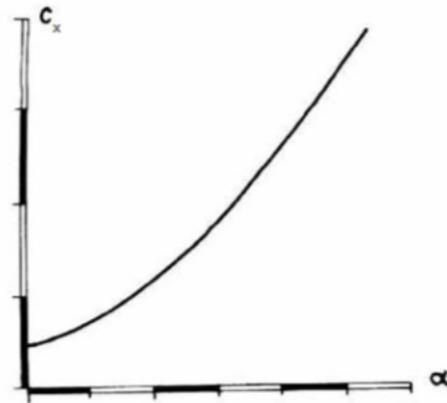


Figura 25. Variación del coeficiente de arrastre con el ángulo de ataque [7]

### 3.9.2 Arrastre debido a fricción y a presión

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. La parte del arrastre debida al esfuerzo de corte de pared  $\tau_w$  se denomina arrastre de fricción en la superficie (o arrastre debido a fricción  $F_{D,fricción}$ ), porque lo provocan los efectos de fricción. La parte que se debe directamente a la presión  $P$  se llama arrastre debido a presión (también llamada arrastre de forma porque tiene una enorme dependencia de la forma del cuerpo). Los coeficientes de arrastre debido a fricción y arrastre debido a presión se definen como:

$$C_{D,friccion} = \frac{F_{D,friccion}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

$$C_{D,presion} = \frac{F_{D,presion}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

Por lo tanto, el coeficiente de arrastre total o la fuerza de arrastre pueden determinarse con simplemente sumarlos:

$$C_D = C_{D,friccion} + C_{D,presion}$$

$$F_D = F_{D,friccion} + F_{D,presion}$$

El arrastre debido a fricción es la componente de la fuerza de fricción en la dirección del flujo, y por lo tanto depende de la orientación del cuerpo, así como de la magnitud del esfuerzo de corte  $\tau_w$ . El arrastre debido a fricción es cero para una superficie plana normal al flujo, y máximo para una superficie plana paralela al flujo, ya que el arrastre debido a fricción en este caso es igual a la fuerza de fricción total sobre la superficie. El arrastre debido a fricción es una fuerte función de la viscosidad, y aumenta con viscosidad creciente [1].

El arrastre debido a presión es proporcional al área frontal y a la diferencia entre las presiones que actúan sobre la parte frontal y posterior del cuerpo sumergido. En consecuencia, el arrastre debido a presión usualmente domina para cuerpos romos, y es pequeño para cuerpos currentilíneos. El arrastre debido a presión se vuelve más significativo cuando la velocidad del fluido es demasiado alta para que el fluido sea capaz de seguir la curvatura del cuerpo y, por lo tanto, el fluido se separa del cuerpo en algún punto y crea una región de presión muy baja en la parte trasera. El arrastre debido a presión en este caso se debe a la gran diferencia de presión entre los lados frontal y posterior del cuerpo [1].

### 3.9.3 Reducción del arrastre mediante el diseño aerodinámico

La primera idea que viene a la mente para reducir el arrastre es hacer un cuerpo más currentilíneo con la finalidad de disminuir la separación del flujo y, por lo tanto, disminuir el arrastre debido a presión. Incluso los vendedores de automóviles resaltan los bajos coeficientes de arrastre de sus vehículos gracias a su forma aerodinámica. Pero, este proceso de cambio de diseño para uno más aerodinámico tiene efectos opuestos sobre los arrastres debido a presión y a fricción. Disminuye el arrastre debido a presión cuando demora la separación de la capa límite, y por lo tanto, reduce la diferencia de presión entre el frente del cuerpo y la parte posterior y aumenta el arrastre debido a fricción cuando aumenta el área superficial. El resultado final depende de cuál efecto domine. En consecuencia, cualquier estudio de optimización

para reducir el arrastre de un cuerpo debe considerar ambos efectos e intentar minimizar la suma de los dos, como se muestra en la figura 26 [1].

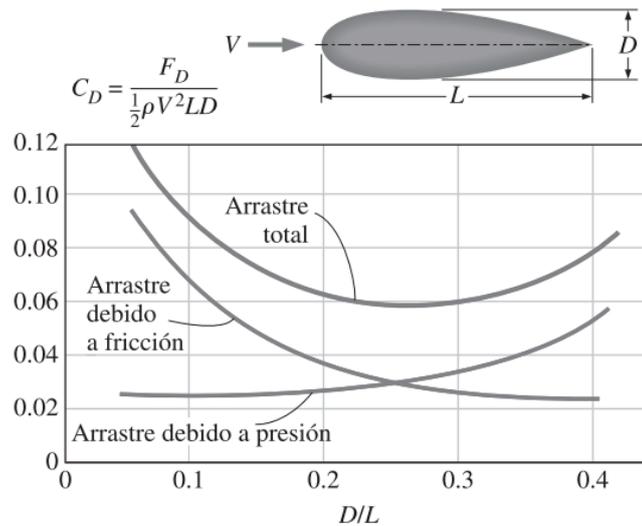


Figura 26. Variación de los diferentes coeficientes de arrastre [1]

El cambio de la forma del cuerpo hacia uno más currentilíneo tiene el beneficio agregado de reducir la vibración y el ruido. Esto debe considerarse sólo para cuerpos romos que están expuestos a flujo de fluidos de alta velocidad (y por lo tanto a números de Reynolds altos), para los que la separación de flujo es una posibilidad real. No es necesario para cuerpos que típicamente involucran los flujos con números de Reynolds bajos porque el arrastre en estos casos casi se debe por completo al arrastre debido a fricción, y el cambio de la forma del cuerpo para una más currentilínea sólo aumentaría el área superficial y por lo tanto el arrastre total. En consecuencia, el cambio descuidado de forma del cuerpo en realidad puede aumentar el arrastre en vez de disminuirlo [1].

### 3.9.4 Eficiencia aerodinámica

La eficiencia aerodinámica se define como la relación entre la fuerza de sustentación y la fuerza de resistencia. El objetivo de la eficiencia aerodinámica es maximizar la carga aerodinámica y minimizando el arrastre para conseguir la máxima eficiencia [7].

$$f = \frac{F_L}{F_D} = \frac{C_L}{C_D}$$

## 4 MODELADO

Ante la evidente imposibilidad de llevar a cabo nuestro proyecto, en primer lugar, con automóviles reales o maquetas a escala, y someterlos a un experimento de túnel del viento, debido en primer lugar a su complejidad, pero principalmente a la falta de recursos tanto logísticos, como económicos, nos centraremos en realizar una simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD).

El primer paso que llevaremos a cabo en nuestro proyecto es la construcción de diferentes automóviles mediante la ayuda de un software, pero para ello deberemos escoger previamente los modelos que queremos implementar en nuestro proceso. Como se indicó en la introducción, nuestro principal objetivo es analizar la evolución aerodinámica de un turismo a lo largo de los años y para ello obtendremos diversos parámetros característicos (coeficientes de arrastre y sustentación).

Por este motivo, analizaremos en primer lugar el Ahmed body. Se trata de un cuerpo conformado por geometrías básicas que se asemeja a grandes rasgos a la estructura de un coche y es comúnmente estudiado con el objetivo de introducirse la aerodinámica básica de un automóvil. A continuación, construiremos dos modelos de turismo con el mayor detalle posible dentro de nuestras limitaciones, el primero semejante a un vehículo actual y por tanto con una geometría más cuidada y aerodinámica, y el segundo a un modelo de coche clásico de la década de los años 80. A través de estos dos diseños cubriremos un espectro de tiempo de entorno a 30 años, consiguiendo representar el desarrollo experimentado en la industria automovilística en materia de diseño de carrocerías.

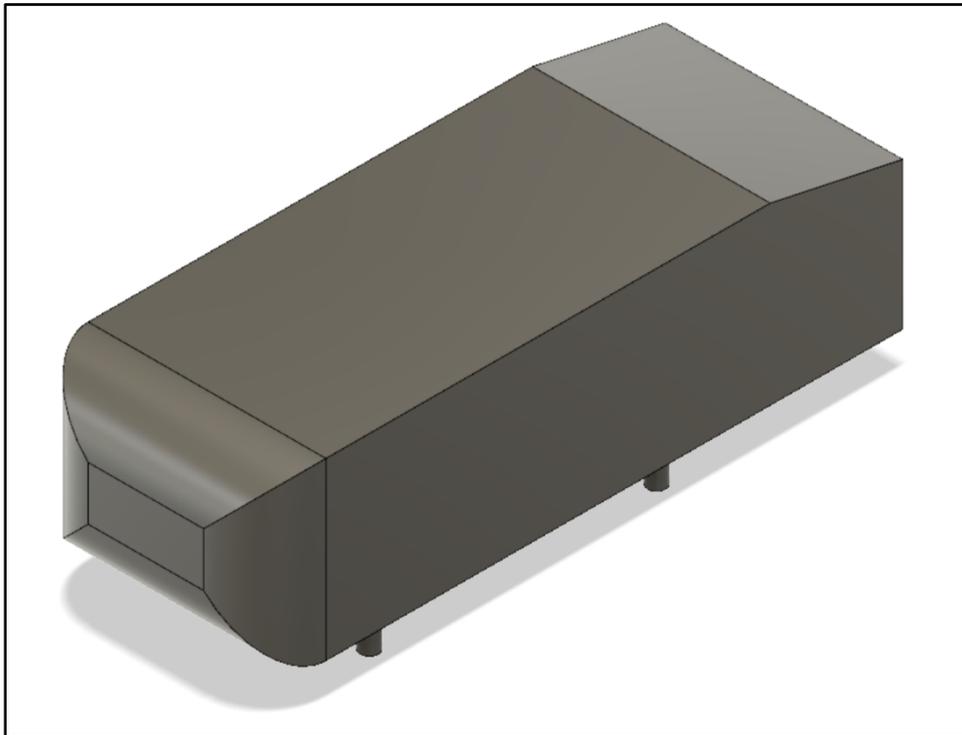
### 4.1 SOFTWARE: AUTODESK FUSION 360

Para llevar a cabo nuestros diseños haremos uso de Autodesk Fusion 360 a través de la licencia de estudiante que nos aporta la Universidad de Cantabria. Fusion 360 es un software para el modelado de sólidos en 3D producido por la empresa de autoDesk, el cual permite conectar todo el proceso de desarrollo de productos, desde el diseño, la simulación y la gestión, hasta su fabricación. Está pensado para trabajar desde cualquier parte y poder colaborar de forma ágil entre los equipos de trabajo. Ha sido desarrollado para cubrir las necesidades diarias de los profesionales del

diseño y la fabricación, a través de una interfaz que combina variedad, simplicidad y velocidad. (Autodesk, 2019)

## 4.2 AHMED BODY

El Ahmed body fue creado por primera vez por S.R. Ahmed en su investigación "Algunas características destacadas de la estela del vehículo promediada en el tiempo" en 1984. Desde entonces, se ha convertido en un punto de referencia ampliamente utilizado en la industria automovilística para validar herramientas de simulación. La forma del cuerpo de Ahmed es lo suficientemente simple de modelar, al tiempo que mantiene las características de geometría básica de un automóvil. Sus dimensiones son: longitud de 1.044 metros, altura de 0.288 metros y ancho de 0.389 metros.



*Figura 27. Diseño en 3D del Ahmed body en Autodesk Fusion 360*

En nuestro caso hemos realizado el Ahmed body a escala 4:1, como se muestra en la Figura 27, para que se aproxime lo máximo posible a las medidas promedio de un turismo estándar. Como podemos observar tiene la forma de un automóvil altamente simplificado, consistente en una parte delantera roma con bordes redondeados, una sección central en forma de caja y una zona trasera que tiene una superficie inclinada superior cuyo ángulo puede variar, teniendo una influencia directa

en el valor de la fuerza de arrastre. El modelo se apoya en patas cilíndricas que sustituyen a las ruedas.

A pesar de descuidar una serie de características propias de un automóvil real (ruedas, superficie inferior rugosa, protecciones, retrovisores, proyecciones de superficie, etc.), el de Ahmed body genera las características esenciales del flujo alrededor de un automóvil que debemos conocer: impacto y desplazamiento del flujo alrededor de la carrocería, flujo relativamente uniforme en la zona media y separación del flujo y generación de vórtices en la parte trasera.

El objetivo principal a la hora de llevar a cabo el análisis de una carrocería de automóvil tan simplificada es comprender los fenómenos del flujo involucrados en la producción de arrastre. Al estudiar las causas involucradas en la generación de resistencia al avance, deberíamos ser capaces de diseñar un automóvil que minimice el arrastre y, por lo tanto, minimizar el consumo de combustible y maximizar su rendimiento.



Figura 28. Perspectiva lateral del Ahmed body donde se muestra el ángulo de inclinación ( $\beta$ )

La principal contribución al arrastre experimentado por un automóvil es causada por la presión normal ejercida sobre cada superficie. Concretamente la parte trasera del vehículo proporcionará la mayor contribución al arrastre por presión y, en particular, el ángulo de ataque o inclinación trasero  $\beta$  (mostrado en la figura 29) es crucial para determinar el modo del flujo de su estela y, por lo tanto, el arrastre experimentado por el vehículo.

Tanto es así que para ángulos de inclinación ( $\beta$ ) inferiores a  $12^\circ$  el flujo permanece unido sobre la pared inclinada, siendo esencialmente bidimensional y generando una baja resistencia. Entre  $12^\circ$  y  $30^\circ$ , el flujo se vuelve mucho más

tridimensional a medida que se forman los vórtices. Múltiples estudios descubrieron que la resistencia máxima se obtiene para un ángulo de inclinación trasero  $\beta \approx 30^\circ$ , donde el flujo permanece parcialmente unido y el arrastre aumenta significativamente a medida que los núcleos de baja presión actúan sobre las superficies traseras. Para ángulos de inclinación más pronunciados ( $\beta > 30^\circ$ ), el flujo se separa por completo, dando como resultado una disminución repentina en la resistencia y vórtices más débiles [4].

En nuestro modelo hemos introducido un ángulo de inclinación de  $15^\circ$ , por lo que estaremos ante un caso de flujo tridimensional junto con la formación de vórtices en su estela.



*Figura 29. Perspectiva frontal del Ahmed body*

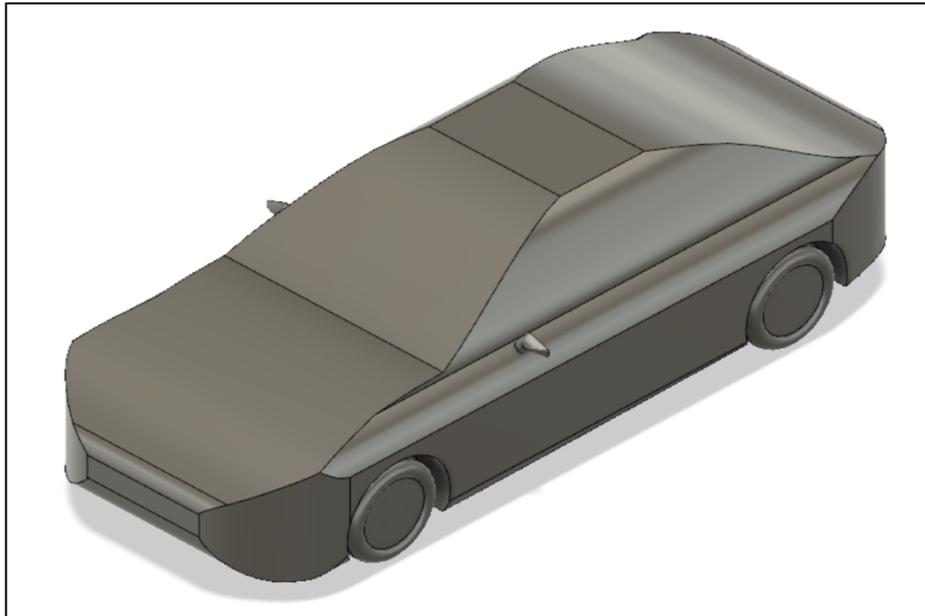
### 4.3 MODELO 1

Tal y como hemos indicado anteriormente uno de nuestros objetivos es analizar aerodinámicamente un modelo de turismo actual. Por este motivo he decidido escoger un automóvil que haya salido a la venta durante el presente año 2019 para inspirarnos en nuestro primer diseño. Se trata del Mercedes A 220 Sedan, mostrado en la figura 30. Tiene unas medidas de 4,56 metros de largo, 1,80 m de ancho y 1,45 m de alto.



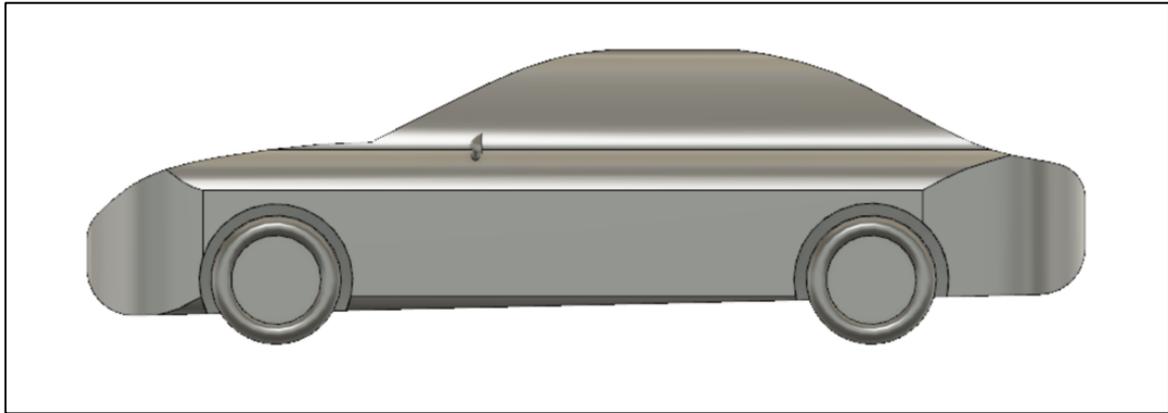
*Figura 30. Mercedes A 220 Sedan 4MATIC (modelo 2019)*

En la figura 31 podemos comprobar el resultado final de nuestro diseño en Fusion 360. Como es evidente hemos tenido que llevar a cabo una serie de simplificaciones en la geometría de nuestro modelo: faros, ruedas, llantas, retrovisores, parabrisas, rejillas, parachoques, juntas de ventanas y puertas, etc... Estos elementos suponen una gran complejidad en su modelado y posterior procesado mediante CFD y además su aportación aerodinámica es prácticamente despreciable para el resultado final.

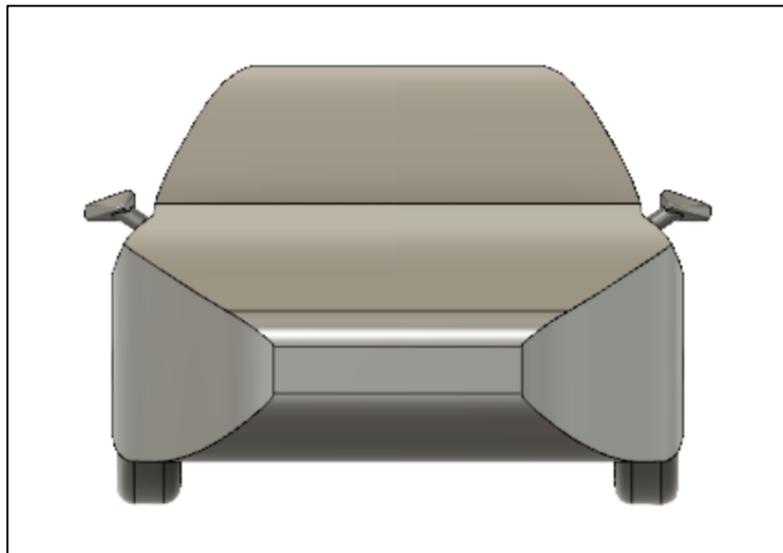


*Figura 31. Diseño en 3D del modelo 1 en Autodesk Fusion 360*

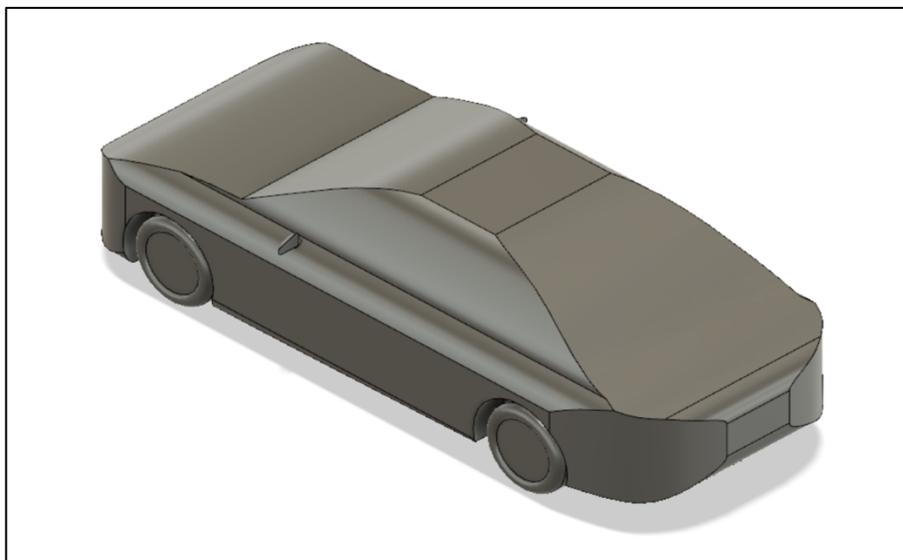
Durante el proceso de diseño de este modelo hemos procurado fijar un ángulo de inclinación de  $15^\circ$ , como podemos observar en la figura 32, al igual que en el Ahmed body para estudiar el desarrollo aerodinámico de la carrocería sin tener en cuenta la aportación de dicho ángulo.



*Figura 32. Perspectiva lateral del modelo 1*



*Figura 33. Perspectiva frontal del modelo 1*



*Figura 34. Perspectiva general trasera del modelo 1*

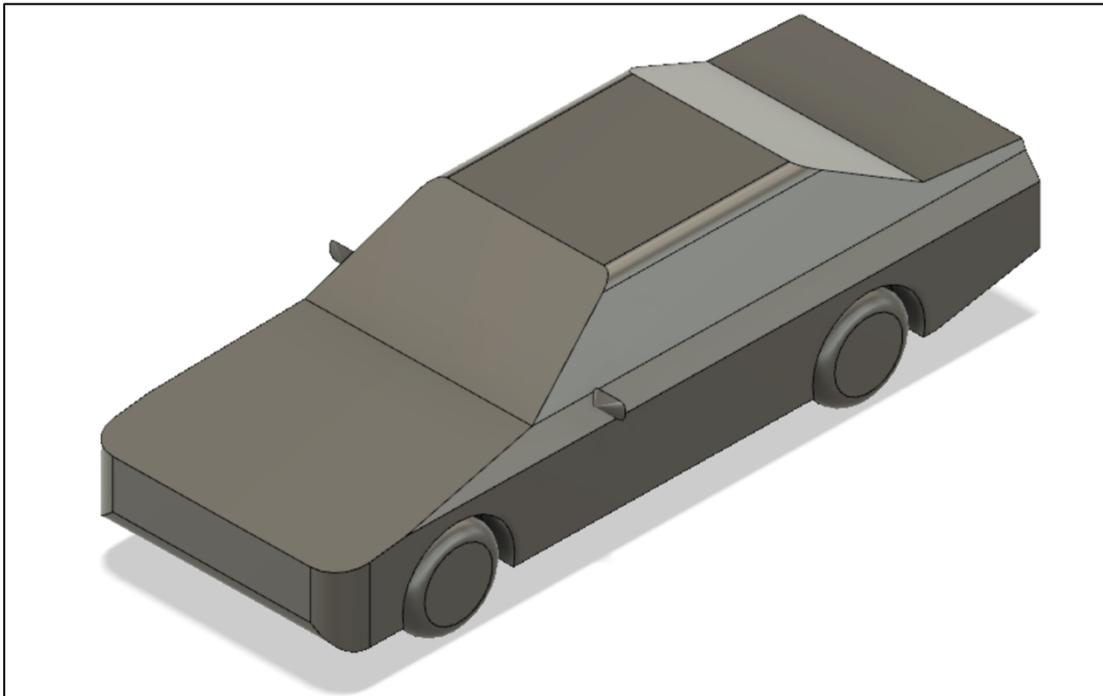
#### 4.4 MODELO 2

Para el diseño de nuestro segundo modelo nos hemos basado en un turismo clásico de la década de los años 80, como es el caso del Mercedes-Benz W124, mostrado en la figura 35. Fue presentado en 1984 y tiene unas medidas de 4,74 metros de largo, 1,74 m de ancho y 1,43 m de alto.

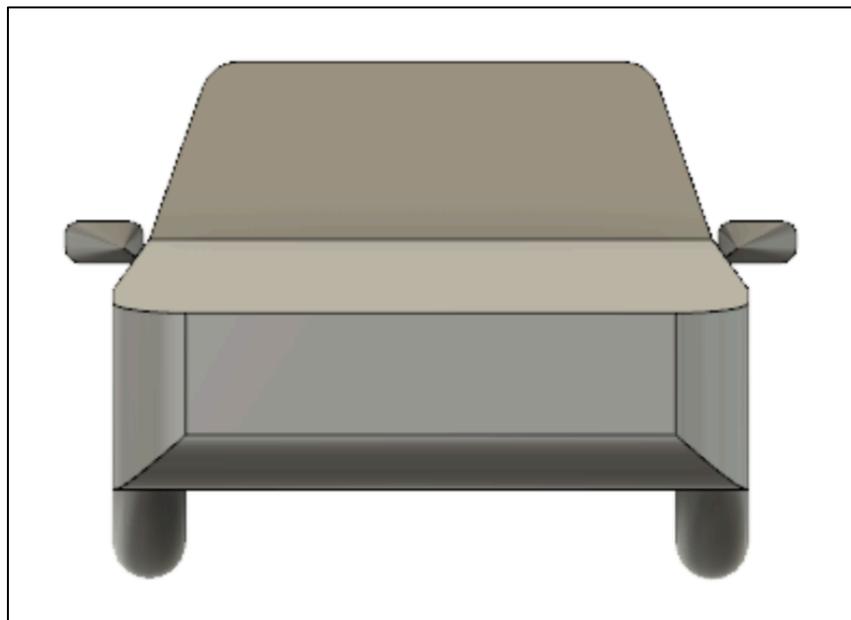


*Figura 35. Mercedes W124 (modelo de 1984)*

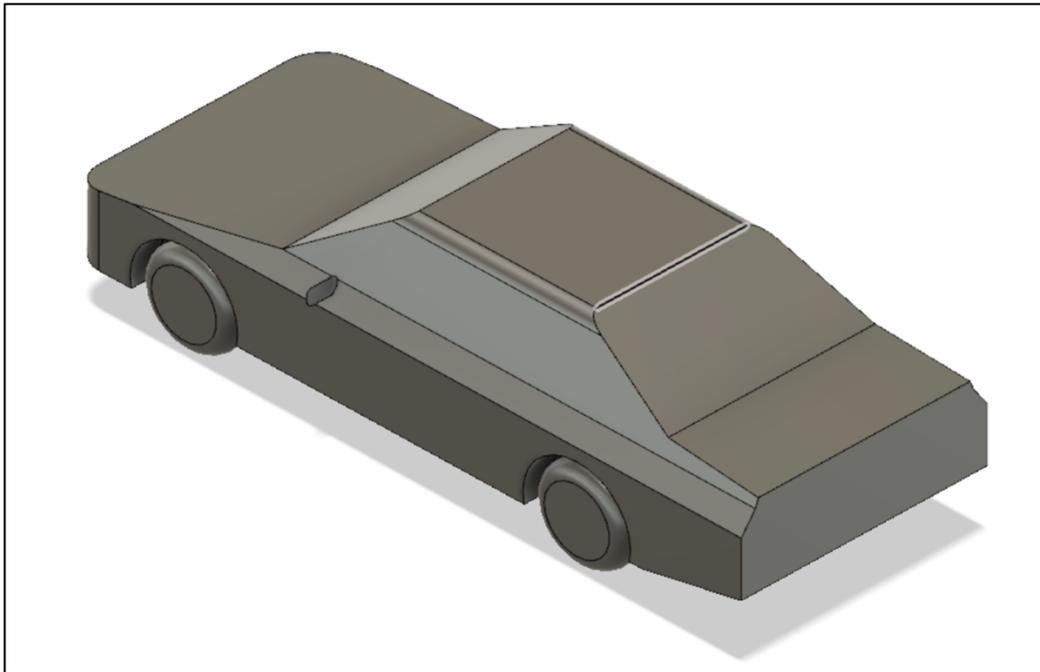
Como podemos observar en la figura 35, este modelo, en consonancia con los prototipos de la época, tiene una geometría de gran rectitud, es decir, con tendencia prismática, menos currentilínea, redondeada y fina en comparación con los automóviles actuales como el del modelo 1. Análogamente al caso anterior hemos tenido que llevar a cabo una serie de simplificaciones en la geometría de nuestro modelo (representado en la figura 36), pero que de igual manera tendrían una aportación insignificante en los resultados.



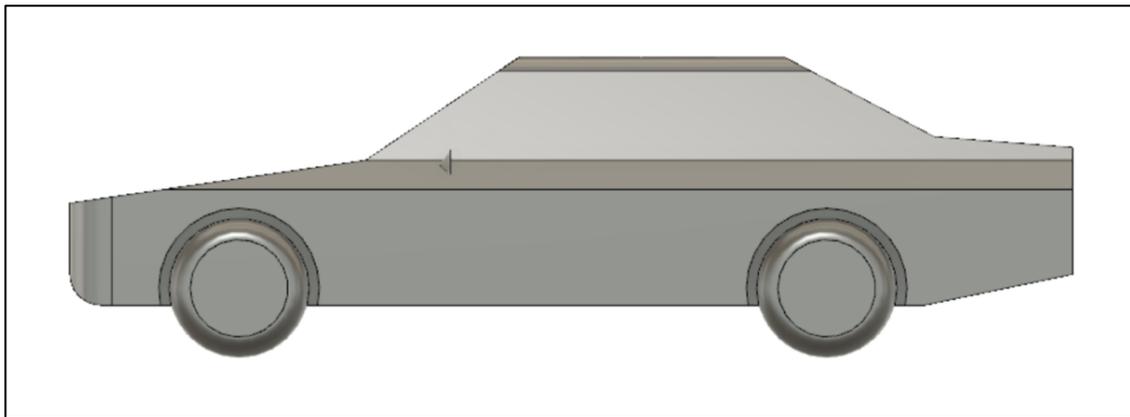
*Figura 36. Diseño en 3D del modelo 2 en Autodesk Fusion 360*



*Figura 37. Perspectiva frontal del modelo 2*



*Figura 38. Perspectiva general trasera del modelo 2*



*Figura 39. Perspectiva lateral del modelo 2*

## 5 SIMULACIÓN AERODINÁMICA MEDIANTE CFD

La dinámica de fluidos computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics), es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza análisis numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujos de fluidos. Para realizar los cálculos se apoya en el uso de un procesador computacional requerido para simular la interacción de líquidos y gases con superficies definidas por las condiciones de contorno.

La base fundamental de casi todos los problemas de CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, capaces de definir diversos tipos de flujo. Estas ecuaciones pueden simplificarse eliminando términos que describen acciones viscosas para obtener las ecuaciones de Euler, empleando un menor grado de detalle para describir la vorticidad. Finalmente, para pequeñas perturbaciones en flujos subsónicos y supersónicos estas ecuaciones pueden ser linealizadas para obtener las ecuaciones potenciales linealizadas.

### 5.1 SOFTWARE

El estudio aerodinámico de nuestros diferentes diseños se ha llevado a cabo a través de un software CFD (Computer Fluid Dynamics). Existen multitud de programas como Flow 3D, Helix, Comsol, Ansys y diferentes extensiones dedicadas al diseño y modelado geométrico de piezas como SolidWorks, Catia, etc.

En nuestro caso se ha elegido Ansys, y concretamente su extensión Fluent, que se define como un software para modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones para aplicaciones industriales que van desde el flujo de aire sobre el ala de una aeronave a la combustión en un horno, desde columnas de burbujas hasta plataformas petrolíferas, desde el flujo de sangre a la fabricación de semiconductores, y desde el diseño de una sala blanca a plantas de tratamiento de aguas residuales. Fluent abarca una amplia gama, que incluye modelos especiales, con capacidades para modelar la combustión en cilindro, aeroacústica, turbomaquinaria y sistemas multifásicos. (ANSYS, 2019).

## 5.2 PROCEDIMIENTO

A continuación, vamos a detallar el procedimiento llevado a cabo en Ansys Fluent para cada uno de los automóviles. Antes de comenzar, debemos exportar nuestros modelos previamente creados en Autodesk Fusion 360 en archivos con formato “.step” para que Ansys los pueda leer correctamente.

En primer lugar, tras abrir el interfaz de Ansys llamado Workbench crearemos un proyecto como hemos dicho antes en su herramienta Fluent. Como podemos observar en la figura 40, el proyecto consta de 6 apartados (propiedades, geometría, mallado, setup, resultados y solución) que deberemos ir configurando paso a paso.

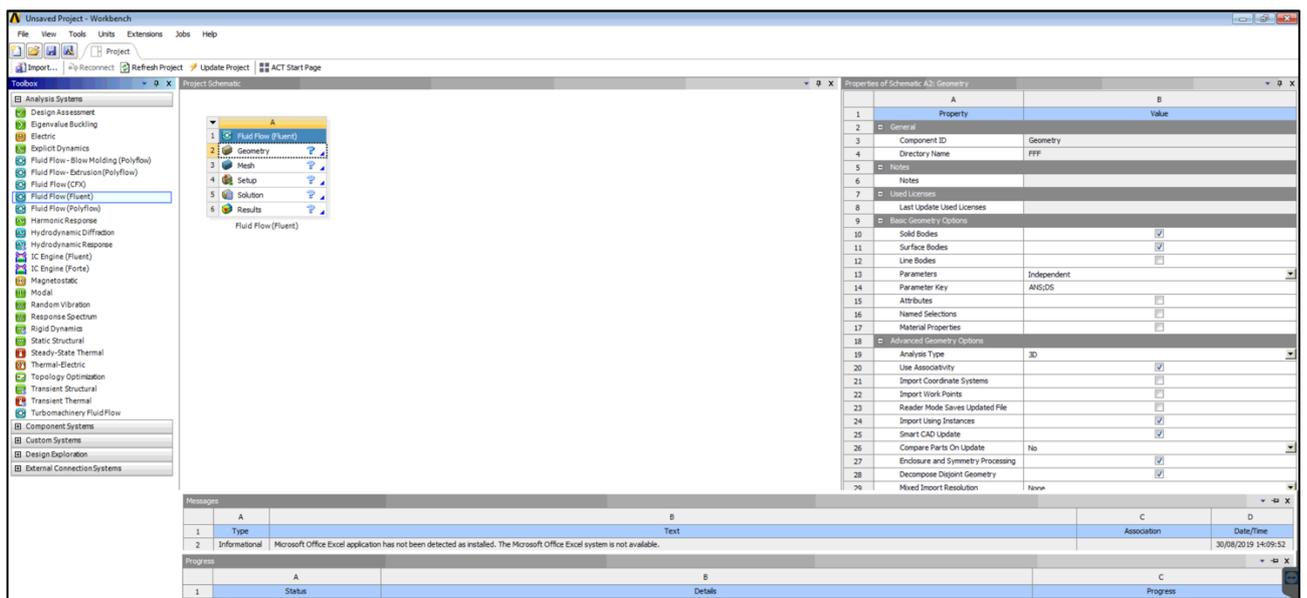


Figura 40. Interfaz de Ansys Workbench con un proyecto de Fluent (ANSYS v2019)

### 5.2.1 Dominio computacional

Comenzaremos con el apartado de geometría seleccionando la opción de análisis 3D, y además importaremos nuestro diseño de automóvil antes de arrancar. Una vez desplegada nuestra geometría, introduciremos un dominio computacional alrededor del vehículo, consistente en un paralelepípedo que lo encerrará. Este dominio desempeñará la función de un túnel de viento y por tanto en su interior discurrirá nuestro fluido (aire). Será la región geométrica del espacio donde posteriormente llevaremos a cabo nuestro análisis, procesado y estudio.

Para fijar las medidas de nuestro dominio computacional hemos tomado como referencia el estudio “Airflow Over an Ahmed Body” [4], el cual especifica las

dimensiones reflejadas en el esquema de la figura 41. Consisten en un ancho y alto de dos veces la longitud de nuestro vehículo, y una profundidad de unas ocho veces dicha longitud. Asimismo, nuestro automóvil se situará al doble de la longitud del coche con respecto a la cara frontal del dominio. El vehículo se encuentra centrado y posado en contacto con la base del dominio.

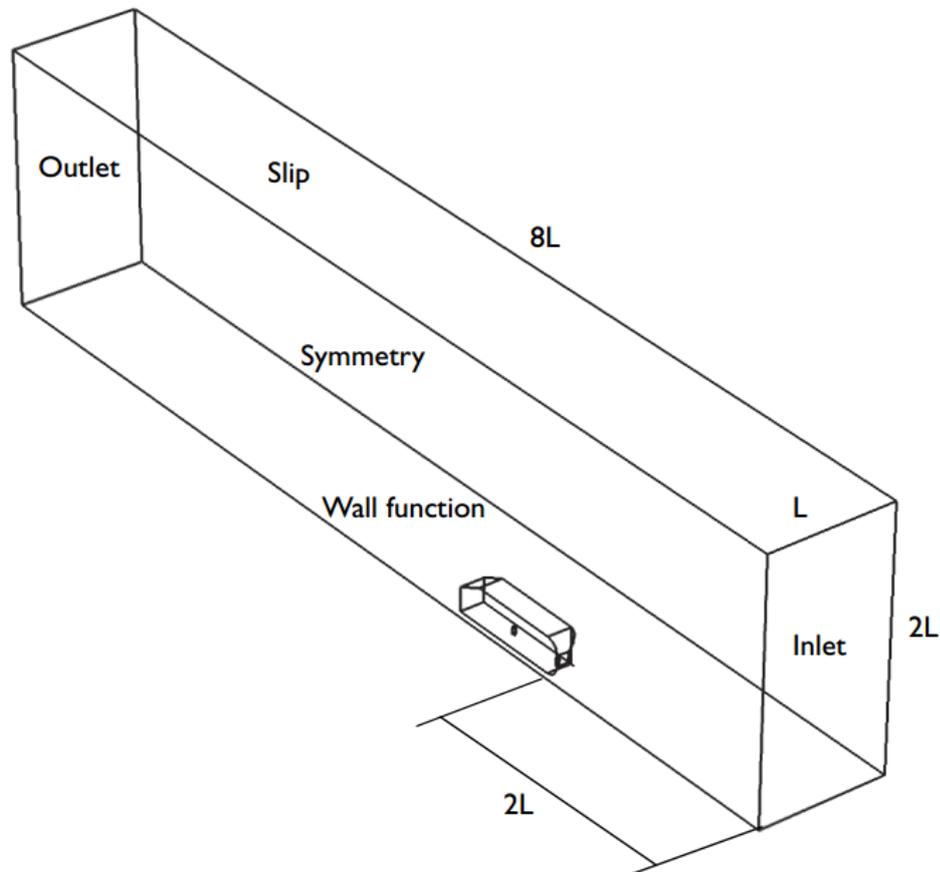


Figura 41. Esquema con las medidas del dominio computacional [4]

Un aspecto fundamental de nuestro proyecto es la simetría de los coches con respecto a su plano medio vertical, esto nos permitirá trabajar con la mitad del dominio, ahorrando en tiempo y procesamiento computacional. Los resultados finales de los coeficientes de arrastre y sustentación serán los mismos, mientras que la única variación se producirá en los valores resultantes de la fuerza, la cual estará referida a la mitad de nuestro vehículo, ya que su área proyectada será evidentemente la mitad de la total. Dicho lo cual, el aspecto final de nuestro dominio computacional para el modelo 1 será el mostrado en la figura 42.

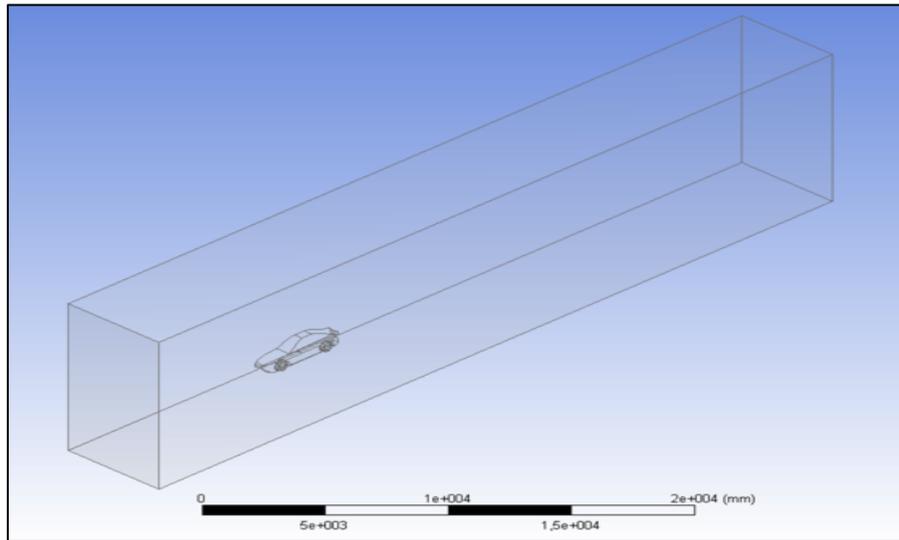


Figura 42. Dominio computacional del modelo 1

### 5.2.2 Mallado

En este paso definiremos la configuración de los volúmenes finitos o celdas que componen nuestro dominio computacional. La construcción de una buena malla es fundamental, ya que afecta a tres aspectos: convergencia de la solución, precisión de los resultados, y tiempo y potencia computacional empleada.

Tras realizar diversas simulaciones iniciales en el Ahmed body, debido a su simplicidad, con varios niveles de precisión, hemos obtenido unos resultados prácticamente idénticos. Por este motivo hemos procedido a realizar una malla (figura 43) con una precisión media en todos los casos, cuyas especificaciones detallaremos a continuación.

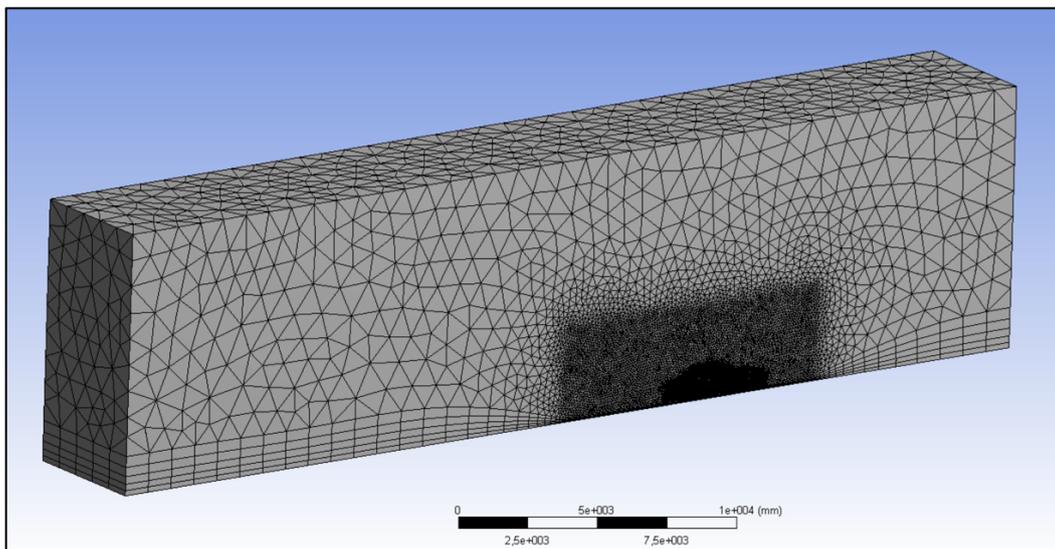


Figura 43. Mallado del modelo 1

En primer lugar, seleccionamos una malla compuesta por elementos tetraédricos, cuyo tamaño será función de la proximidad y curvatura de nuestro vehículo y cuya transición será suave con un factor de 1,2. Paralelamente, hemos limitado el tamaño de los elementos de la malla a un máximo de 1000 mm y un mínimo de 10 mm. Además, envolviendo la superficie del automóvil y en la base del dominio, que hace las veces de carretera, hemos introducido cinco capas (boundary layers) de geometría prismática, apreciables en las figuras 44 y 45, con la finalidad de aportar una mayor precisión en los fenómenos que acontecen en la capa límite.

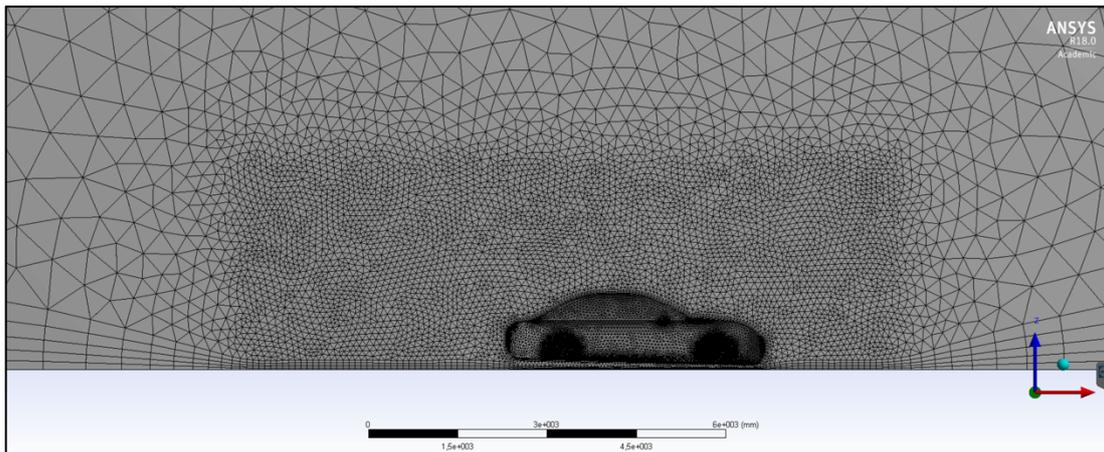


Figura 44. Detalle de la malla del modelo 1

Por otro lado, hemos creado un prisma formado por elementos de 120 mm que encerrará a nuestro coche, como se muestra en la figura 44, con el objetivo de captar con mas detalle los efectos del flujo en las proximidades de la superficie y en la estela del vehículo, donde que puedan crearse vórtices de aire.

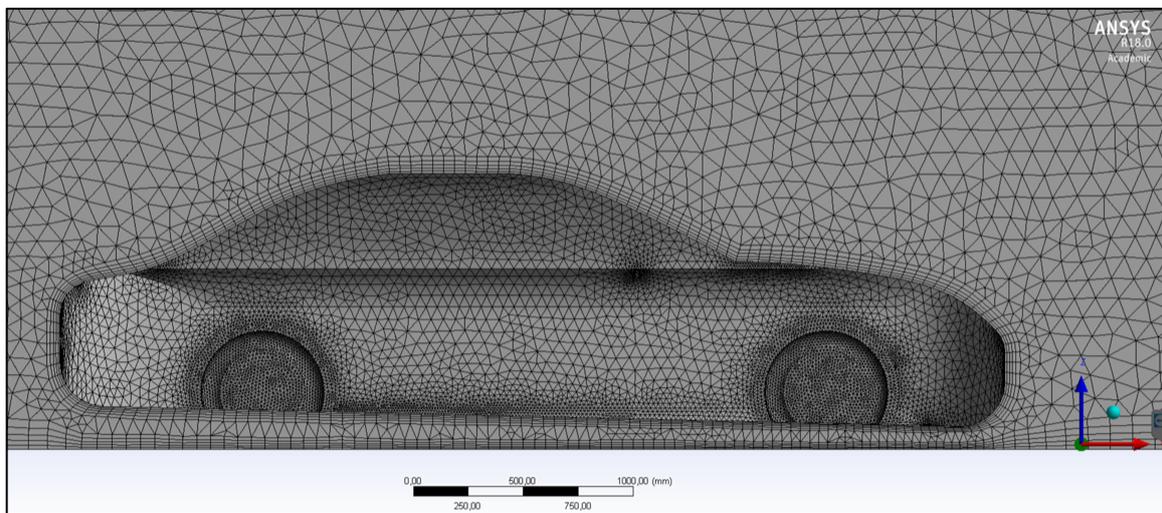


Figura 45. Detalle de la malla en la superficie y caras del modelo 1

Asimismo, hemos impuesto una restricción de 50 mm en el tamaño de los elementos en torno a las caras del coche, con la excepción de los neumáticos y pasos de rueda donde serán de 15 mm. En la imagen 46 podemos apreciar con mayor claridad la diferencia de tamaños y concentración de las celdas en cada zona, y las diversas capas prismáticas creadas.

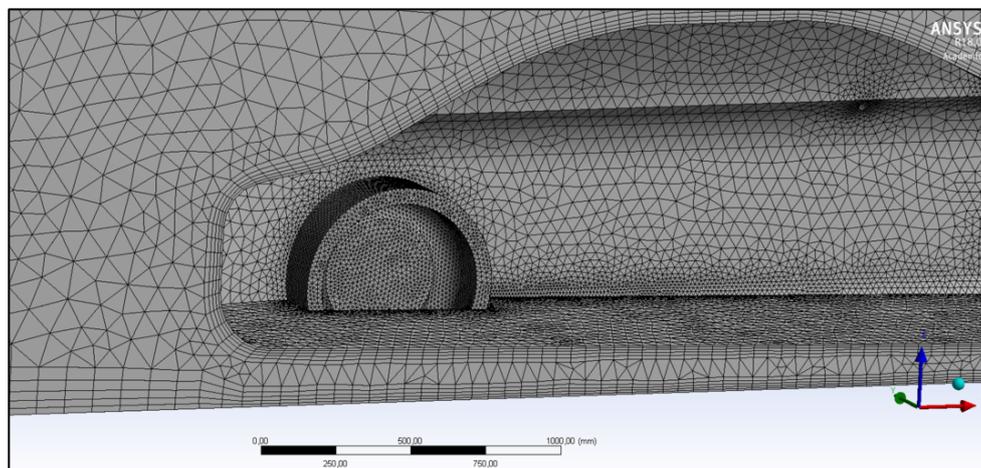


Figura 46. Detalle de la variación de tamaño y concentración de elementos de la malla

Atendiendo a todas las especificaciones anteriormente descritas obtenemos el número de nodos y elementos de malla mostrado en la tabla 1 para cada diseño.

MODELO	Nº nodos	Nº elementos
Ahmed body	177.392	750.792
Modelo 1	334.449	1.413.728
Modelo 2	332.852	1.299.313

Tabla 1. Número de componentes del mallado por modelo

Como podemos comprobar en los datos de la tabla, a mayor complejidad en el diseño, como es el caso del modelo 1, es necesario un mayor número de componentes o volúmenes finitos en nuestra malla, para garantizar un correcto procesado.

### 5.2.3 Parámetros del sistema

Una vez construida nuestra malla en el dominio computacional a estudiar es el momento de fijar una serie de parámetros y condiciones de contorno en nuestro sistema para alcanzar una solución lo mas precisa posible, con una rápida convergencia.

El primer paso es seleccionar el fluido de nuestro dominio, Ansys por defecto selecciona el aire y establece unas propiedades para el entorno que podemos ver en la tabla 2.

Densidad	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	$1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Presión	101325 Pa
Temperatura	288 K

Tabla 2. Propiedades del aire en nuestro sistema

Seguidamente, debemos aplicar una serie de condiciones de contorno a cada una de las caras de nuestro dominio computacional. Las caras frontal y trasera serán la entrada (velocity inlet) y salida (pressure outlet) respectivamente de nuestro flujo de aire. El conjunto de caras que conforman la superficie de nuestro vehículo las fijaremos como paredes estacionarias y las aplicaremos la condición de no deslizamiento. La cara inferior de nuestro dominio que simula la función de la carretera también la dotaremos de la condición de no deslizamiento. Las tres caras restantes no será necesario aplicarlas condición alguna ya que Ansys las fijará por defecto como simetrías y no alterarán el comportamiento del fluido, serán paredes ideales.

Un aspecto crucial en nuestra configuración será la elección del modelo de turbulencia del flujo. Como explicamos en el apartado 3.7, hemos decidido escoger el modelo k- $\epsilon$  realizable, y para ello tenemos que introducir valores para algunas constantes presentes en sus ecuaciones de funcionamiento:

$$C_2 = 1,9 \qquad Pr_{TKE} = 1 \qquad Pr_{TDR} = 1,2$$

Además, dentro de los parámetros de entrada y salida de nuestro dominio debemos definir los valores de la intensidad turbulenta y la tasa de viscosidad turbulenta, que permitirán completar nuestro modelo turbulento. De acuerdo con el manual de Ansys [5] la intensidad turbulenta ( $I$ ) toma unos valores entre 1% y 10%, pero nosotros introduciremos su valor medio  $I=5\%$ , mientras que la tasa de viscosidad turbulenta para flujos externos se establece en 10.

Por otro lado, una vez que hemos fijado estos parámetros es el momento de introducir las condiciones de desplazamiento de nuestro vehículo. Como hemos indicado con anterioridad en el planteamiento de nuestro proyecto, el automóvil se desplazará a una velocidad de 120 km/h que es el límite legal que marca la ley en España. A su vez suponemos unas condiciones de viento frontal adverso de 20 km/h. En Ansys la velocidad de entrada del fluido debe ser la velocidad relativa entre el aire y el automóvil, que por tanto en nuestro sistema tendrá un valor de 140 km/h, que convertido a unidades del sistema internacional son aproximadamente 40 m/s.

Antes de comenzar con nuestra simulación se requiere que introduzcamos el área proyectada de cada vehículo en la dirección del flujo, para lo cual Ansys tiene una herramienta que nos permite calcular áreas proyectadas en cualquier dirección. En la tabla 3 podemos ver los valores para cada modelo.

AREA PROYECTADA	
Ahmed body	0,92025 m <sup>2</sup>
Modelo 1	0,88594 m <sup>2</sup>
Modelo 2	0,99357 m <sup>2</sup>

Tabla 3. Valores del área proyectada para cada modelo

Finalmente, solo nos queda por determinar el tipo de método matemático que queremos que emplee nuestro procesador en cada iteración. Seleccionaremos el método de volumen finito centrado en la celda, consistente en una interpolación entre los centros de cada celda para tener valores a lo largo del dominio. En cuanto a la discretización espacial para el cálculo de las variables de la energía cinética turbulenta, la tasa de disipación energética y el momento fijaremos métodos de

resolución de primer orden para las primeras 100 iteraciones con la finalidad de conseguir una convergencia mas rápida y acercarnos a la solución en el menor tiempo posible ahorrando potencia computacional. Tras esto, pasaremos a métodos de segundo orden durante al menos 900 iteraciones mas para garantizar la convergencia.

Una vez establecida la configuración que deseamos, solo falta introducir los monitores correspondientes para los coeficientes de arrastre y sustentación que nos permitirán visualizar los valores que tomen iteración a iteración, comprobando así sus posibles oscilaciones y potencial convergencia.

Sin embargo, es imprescindible llevar algún tipo de control añadido durante el procesado computacional, esto lo podemos obtener mediante la monitorización de los residuos de las ecuaciones de conservación y transporte. Los residuos son una medida de desequilibrio local de cada ecuación del volumen de control, el tipo más común es el RMS (Root Mean Square). También podríamos definir un residuo como la desviación absoluta de un resultado respecto a la solución exacta. El orden de magnitud de los residuos se puede establecer como criterio de convergencia, ya sea cuando alcance el valor de  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ , etc.

Como es evidente, los residuos nunca alcanzaran el cero, pero es una condición indispensable que disminuyan con el paso de las iteraciones, como se refleja en la figura 47 correspondiente a los residuos de la simulación del modelo 1.

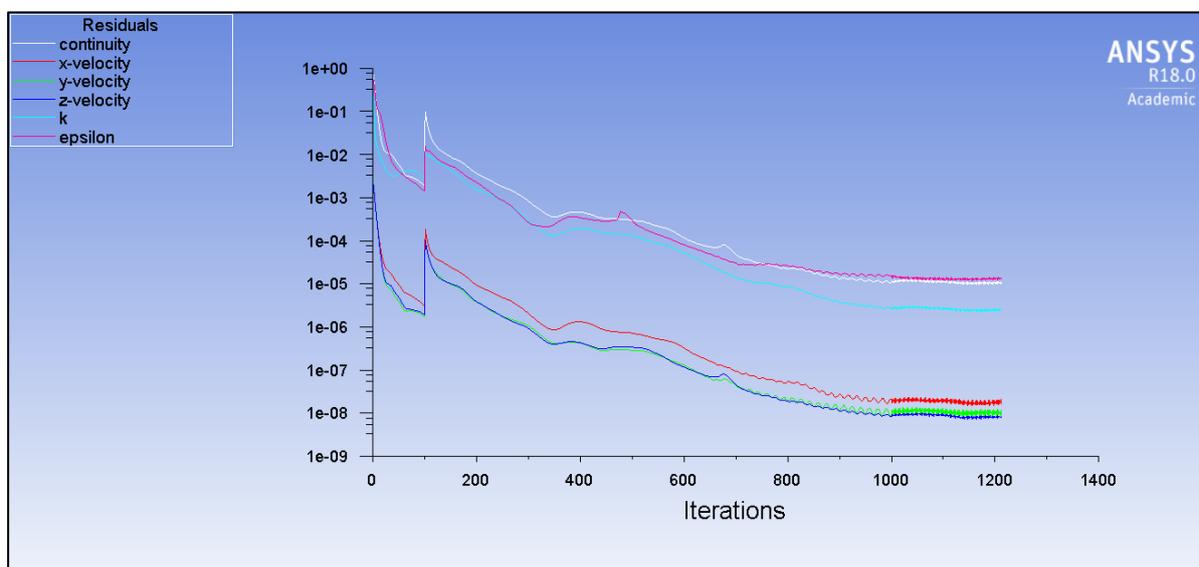


Figura 47. Gráfica de los residuos del modelo 1

Podemos comprobar que los residuos de la velocidad del fluido en las tres direcciones espaciales son considerablemente inferiores que los correspondientes a las ecuaciones de continuidad y transporte, esto se debe a la complejidad de la resolución del flujo turbulento. El residuo al que mas atención debemos prestar es el correspondiente a la continuidad, ya que su paulatino descenso nos indica que la simulación tiende a la convergencia y por tanto obtendremos un resultado válido.

No obstante, no podemos considerar los residuos como garantía única y suficiente de convergencia, por este motivo recurrimos a los monitores de los coeficientes de arrastre ( $C_D$ ) y sustentación ( $C_L$ ) mostrados en las figuras 48 y 49 para el modelo 1.

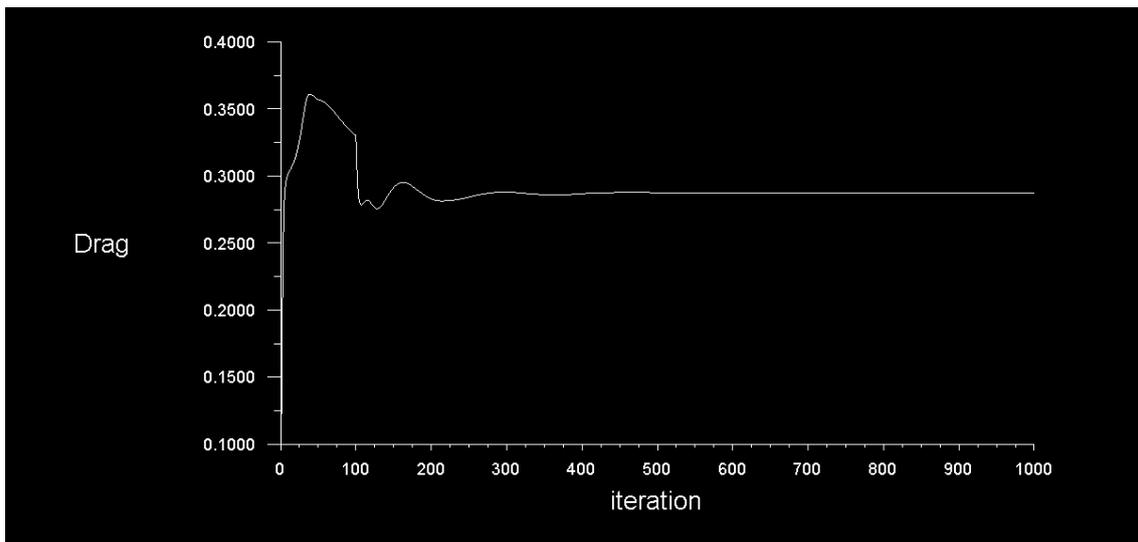


Figura 48. Monitor del coeficiente de arrastre del modelo 1

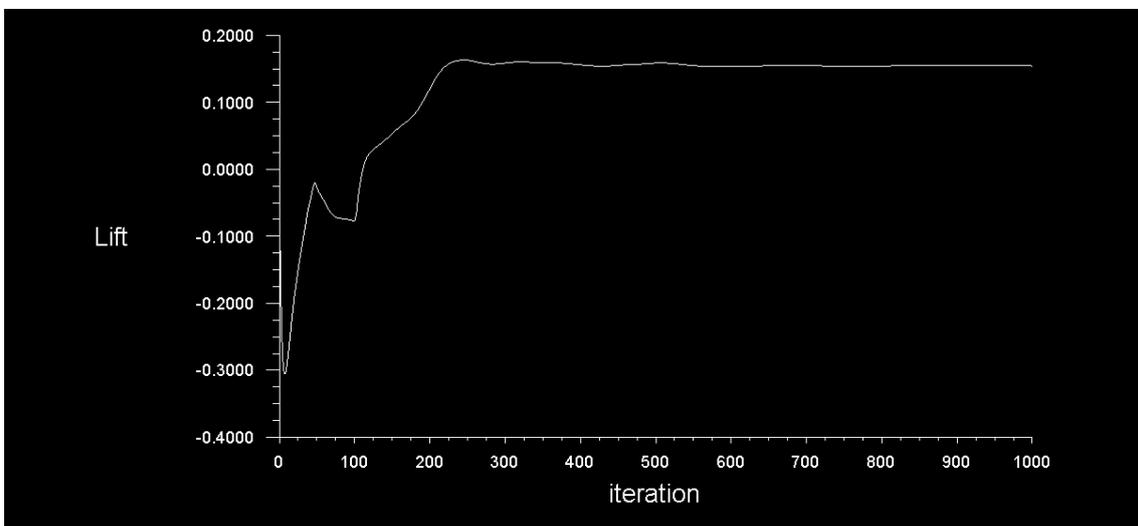


Figura 49. Monitor del coeficiente de sustentación del modelo 1

El coeficiente de arrastre empieza a estabilizarse entorno a la iteración 400, mientras que el coeficiente sustentación no se estabiliza hasta aproximadamente la iteración 600. Finalmente, se puede garantizar la convergencia del proceso.

Hemos hecho referencia a los resultados y gráficos del modelo 1 ya que tiene una geometría mas detallada, precisando de una mayor potencia computacional y por tanto reviste una mayor complejidad en su procesado, pero el mismo proceso ha sido realizado para los otros 2 modelos obteniendo igualmente resultados satisfactorios.

## 6 RESULTADOS

Este capítulo está focalizado hacia el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones de Fluent para cada modelo de automóvil. Como indicamos anteriormente hemos supuesto una velocidad media de 120 km/h para cada vehículo, además de unas condiciones de viento frontal adverso de 20 km/h. Esto equivale a una velocidad relativa de 140 km/h del aire con respecto al automóvil, que aproximaremos a 40 m/s. Podemos comprobar que es una velocidad ligeramente superior (144 km/h) a la establecida, pero es conveniente estudiar el proceso con un cierto margen ante potenciales situaciones excepcionales, de ahí los coeficientes de seguridad con los que se trabaja en cualquier proceso industrial.

A continuación, se exponen en la tabla 4 los resultados del coeficiente y las fuerzas de arrastre junto con sus componentes de presión y fricción obtenidos en Ansys para cada diseño. Como se explicó en el apartado 5 en referencia al dominio computacional, al trabajar con la mitad del automóvil los resultados de cada esfuerzo deben multiplicarse por dos para obtener la fuerza total ejercida sobre el vehículo.

MODELO	$C_D$	$F_{D,presión} \text{ (N)}$	$F_{D,fricción} \text{ (N)}$	$F_D \text{ (N)}$
Ahmed body	0,25298	195,011	33,138	228,15
Modelo 1	0,28714	220,79	28,505	249,295
Modelo 2	0,41318	379,352	23,772	403,214

Tabla 4. Resultados de los componentes del arrastre en cada modelo

El primer dato que salta a la vista es la notable diferencia de entorno a 150 N en la fuerza de arrastre del viento entre el modelo 1 y el modelo 2, que referida a la totalidad del dominio sería de unos 300 N. Esto se constata con la diferencia en el coeficiente de arrastre causada puramente por el avance en el diseño de la carrocería de los automóviles modernos. Esta diferencia supone un ahorro de potencia importante para el vehículo aumentando la eficiencia y el rendimiento del mismo.

Sin embargo, los resultados para el Ahmed body y el modelo 1 son similares tanto en las fuerzas de arrastre como en las de sustentación como era de esperar,

debido a que el Ahmed body es una simplificación geométrica de un coche y por tanto soportará una pequeña carga aerodinámica.

Por otra parte, como explicamos en el apartado 3.9 correspondiente a la aerodinámica, la mayor aportación a la fuerza de arrastre la realiza su componente dependiente de la presión y esto se certifica en los resultados de todos los modelos donde esta componente supone cerca del 90% del total.

Ahora mostramos en la tabla 5 los resultados del coeficiente y las fuerzas de sustentación junto con sus componentes de presión y fricción obtenidos en Ansys para cada diseño.

MODELO	$C_L$	$F_{L, \text{presión}} \text{ (N)}$	$F_{L, \text{fricción}} \text{ (N)}$	$F_L \text{ (N)}$
Ahmed body	0,0938	84,359	0,238	84,597
Modelo 1	0,1548	131,266	2,683	133,949
Modelo 2	-0,08446	-83,894	1,481	-82,4125

Tabla 5. Resultados de los componentes de la sustentación en cada modelo

De nuevo, lo más reseñable de estos resultados es la diferencia en la fuerza de sustentación entre el modelo 1 y el modelo 2, en este caso del orden de unos 200 N. Además, hay otro aspecto importante a tener en cuenta y es el valor negativo de la fuerza y el coeficiente de sustentación en el modelo 2. El significado físico del mismo es que dicha fuerza tiende a empujar al vehículo hacia el suelo, mientras que en el Ahmed body y el modelo 1 tiende a levantarlo. No obstante, el peso de un coche oscila entre los 7000 y los 10000 Newtons por lo que el impacto de las fuerzas de sustentación de todos los modelos puede considerarse prácticamente despreciable.

Análogamente a los resultados del arrastre, la mayor aportación a la fuerza de sustentación la realiza su componente dependiente de la presión, la cual supone alrededor del 95% del total en este caso.

Con la finalidad de complementar nuestro estudio aerodinámico vamos a proceder a analizar las gráficas que Ansys se encarga de simular correspondientes a las líneas de corriente del flujo (aire), velocidad, presión y turbulencia. En primer lugar,

comenzaremos con el Ahmed body para comprender los fenómenos básicos del flujo que pueden suceder en un automóvil, para posteriormente pasar a analizar los modelos 1 y 2.

## 6.1 AHMED BODY

Como hemos explicado anteriormente el Ahmed body es un primer paso en nuestro estudio de la aerodinámica de un automóvil, que nos permitirá comprender a grandes rasgos parámetros y fenómenos clave en nuestro análisis.

En la figura 50 podemos observar la gráfica de contorno de la velocidad del aire entorno al cuerpo en el plano medio de simetría del mismo. Lo primero que llama la atención es la zona de la parte trasera del vehículo o estela, donde la velocidad del fluido es notablemente baja (5 m/s), y por tanto es susceptible de desarrollar vórtices. Asimismo, en la cara frontal donde impacta el aire también se produce un frenado del mismo. Sin embargo, en las aristas redondeadas de la parte frontal el fluido se ve acelerado hasta los 60 m/s aproximadamente.

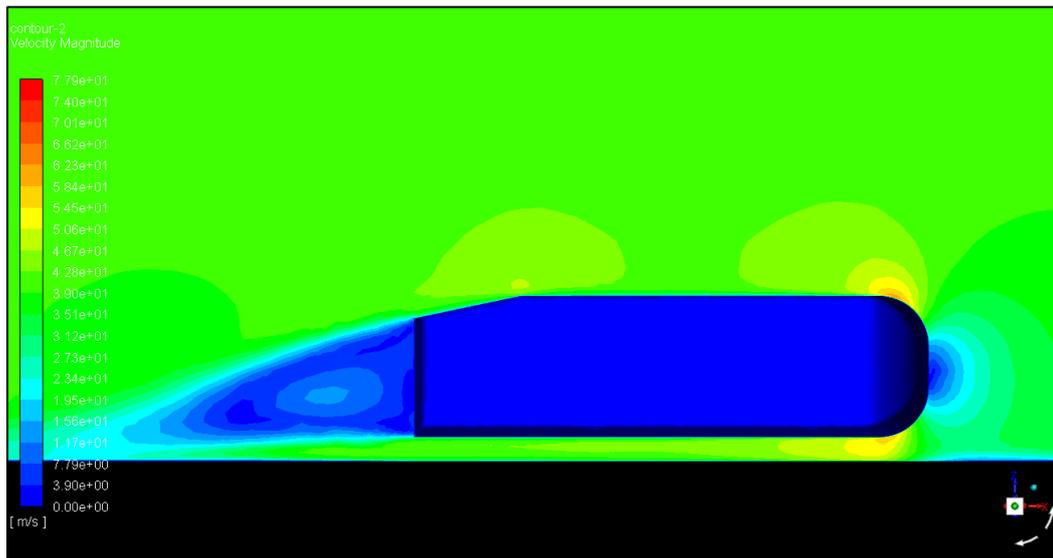


Figura 50. Gráfica de contorno de la velocidad del fluido (m/s)

Para ver con un mayor detalle la trayectoria y particularidades del flujo hacemos uso de la gráfica de líneas de corriente mostrada en la figura 51. Aquí se aprecia con mayor nitidez que en la parte trasera se forman 2 vórtices, el superior de una mayor dimensión. Ambos vórtices aportarán sustentación positiva a nuestro diseño. Por otro lado, podemos ver que el ángulo de inclinación aplicado no genera una separación del flujo como esperábamos.

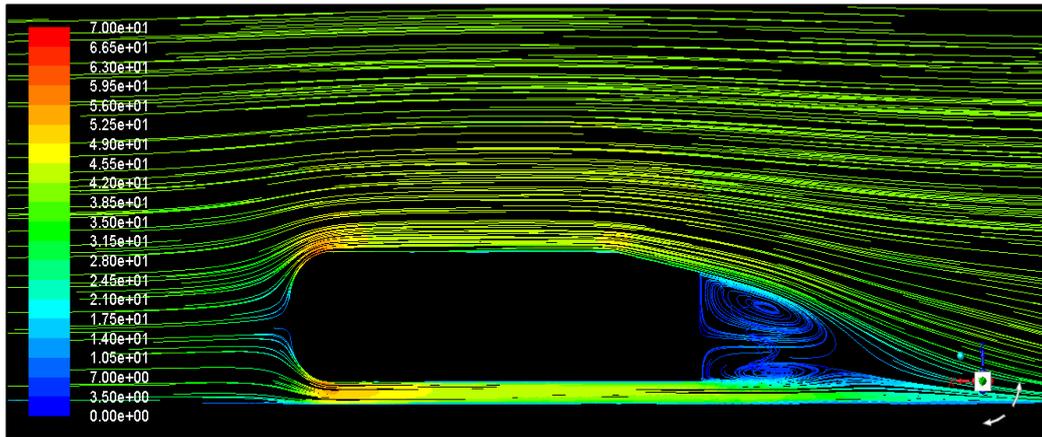


Figura 51. Gráfica de las líneas de flujo en el Ahmed body

A continuación, en la figura 52 se muestra la gráfica correspondiente a la turbulencia del sistema. Como era de esperar, las zonas de mayor turbulencia son las superficies curvas de la cara frontal donde el aire se ve acelerado, así como la arista del ángulo de inclinación por la misma causa, aunque en menor medida.

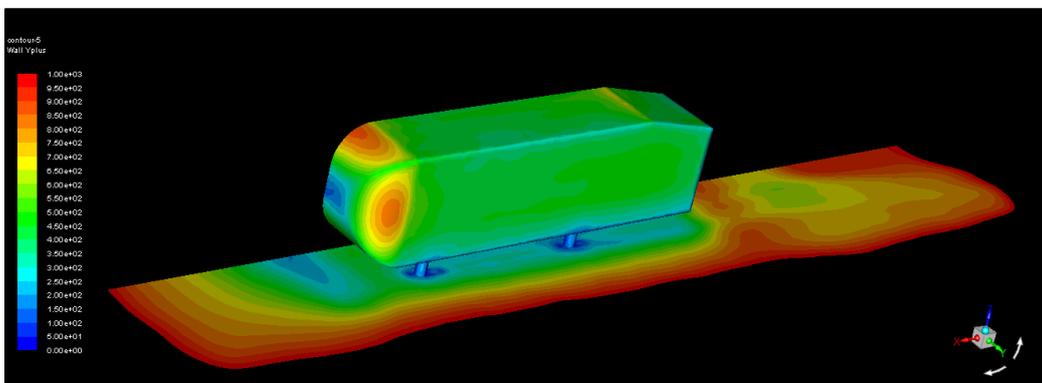


Figura 52. Gráfica de la turbulencia correspondiente al Ahmed body

Por ultimo, la figura 53 muestra la gráfica correspondiente al coeficiente de presión, el cual es máximo en la cara delantera porque sufre un mayor empuje al ser la superficie de impacto del flujo.

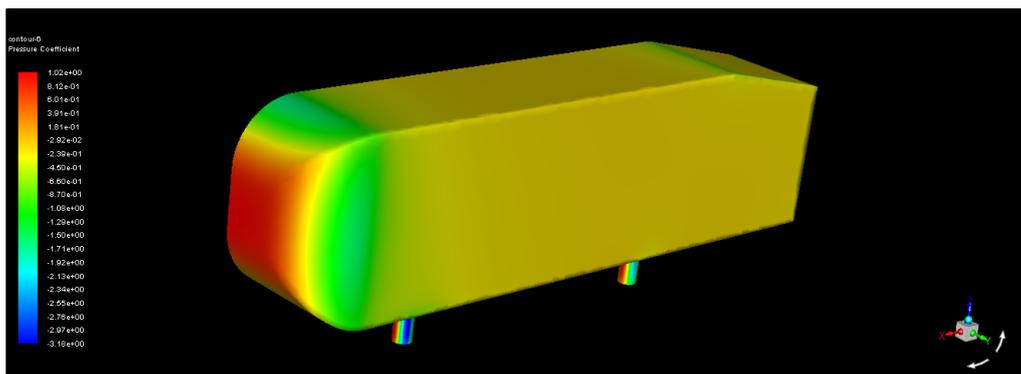


Figura 53. Gráfica del coeficiente de presión en el Ahmed body

## 6.2 MODELO 1

Teniendo en cuenta los fenómenos anteriormente descritos en el Ahmed body, procedemos al análisis del modelo 1 prestando especial atención a estos.

En primer lugar, extraemos la representación de las líneas de corriente en la figura 54, donde la escala de colores representa la velocidad del flujo. Al igual que sucedía en el caso del Ahmed body el flujo se ve acelerado en las transiciones de superficie de la parte superior y en el capó, superando los 50 m/s.

El principal aspecto a remarcar de esta gráfica es la turbulencia en el flujo que sucede en la estela del automóvil. Nuevamente, parece que se forma un vórtice junto con otro tenue arremolinamiento del flujo encima de este.

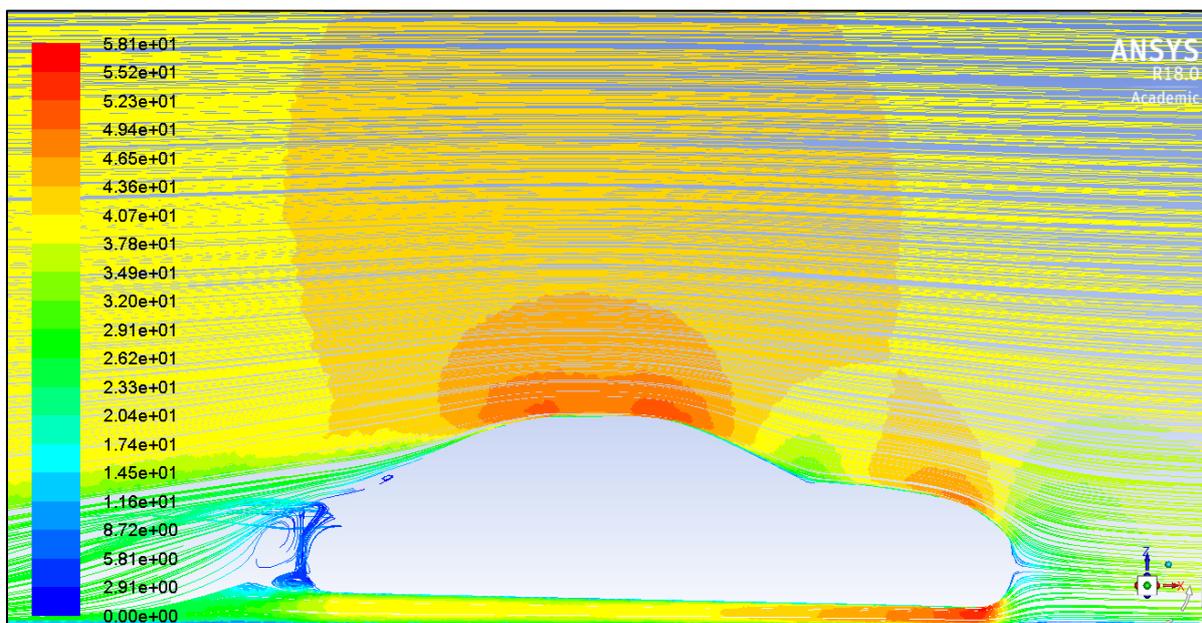


Figura 54. Gráfica de las líneas de corriente (velocidad) para el modelo 1

Con la finalidad de observar con una mayor claridad los vórtices hemos precedido a realizar una captura ampliada sobre esa zona (figura 55). Aquí podemos apreciar que el vórtice inferior está completamente formado, mientras que el superior es algo más débil. El hecho de que este vórtice no se haya terminado de formar supone una contribución positiva para la sustentación.

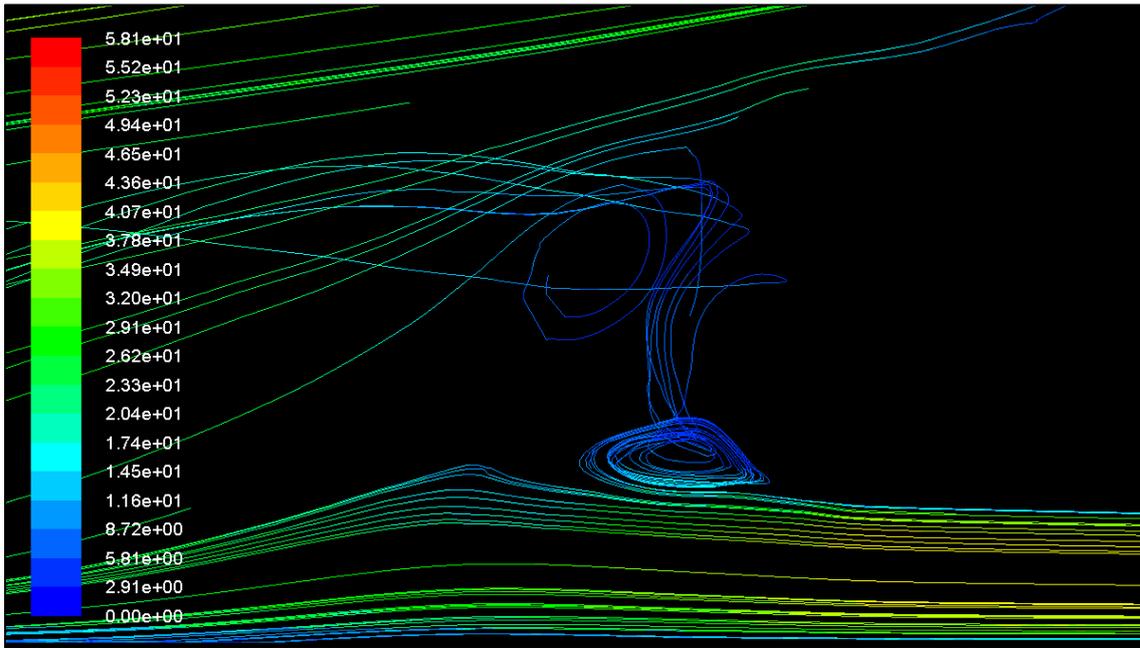


Figura 55. Detalle de los vórtices en la parte trasera del modelo 1

Seguidamente, apreciamos que en la superficie trasera inclinada se produce una separación del flujo debido a la silueta de nuestro vehículo, este fenómeno se desarrolló en el apartado 3.4.2. Asimismo, podemos ver que el flujo se ve acelerado en el espacio entre la carretera y el chasis, a una distancia media entre ambas. Aplicando el teorema de Bernoulli (apartado 3.5) a este fenómeno y a la aceleración del aire en la parte superior, podemos explicar la disminución de la presión estática, como se certifica en la figura 56.

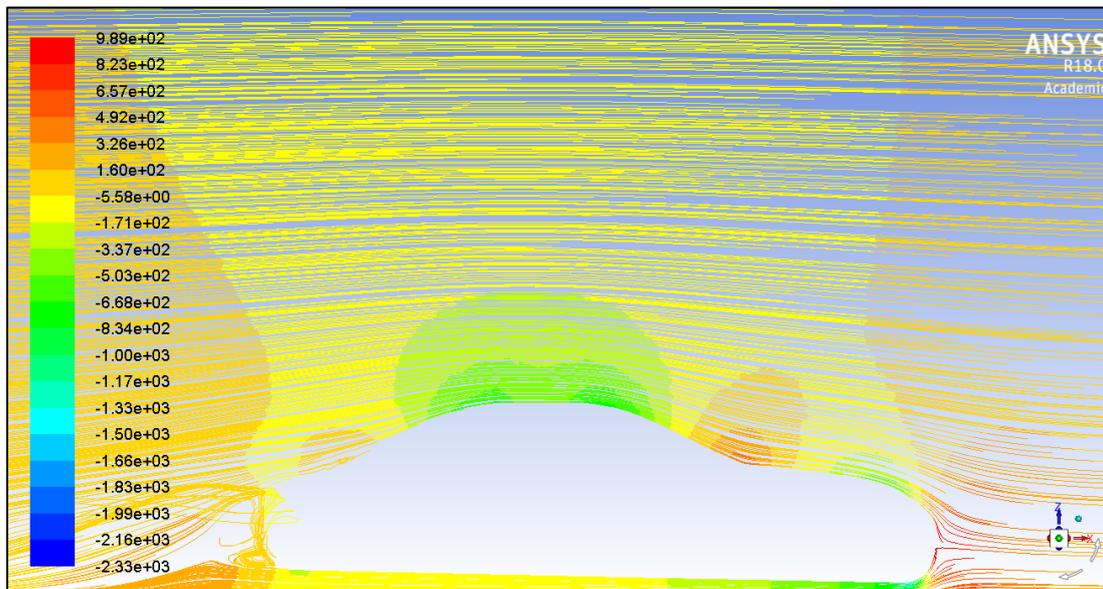


Figura 56. Gráfica de las líneas de corriente (presión) para el modelo 1

Además de la grafica anterior es interesante representar la presión total sobre la superficie de nuestro modelo como se muestra en la figura 57. La zona del spoiler delantero y el capó son las zonas sometidas a un mayor esfuerzo, superando los 1000 Pa, seguido de las ventanillas que alcanzan los 700 Pa. Los neumáticos y las llantas soportan una menor presión, con un valor aproximado de 50 Pa.

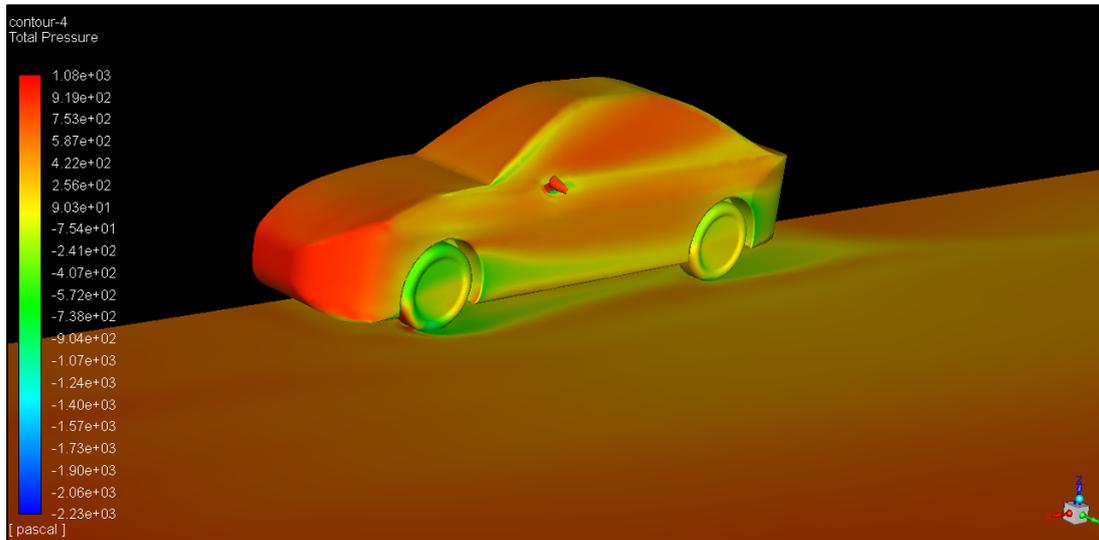


Figura 57. Gráfica de la presión total sobre la superficie del modelo 1

## 6.3 MODELO 2

Por último, vamos a llevar a cabo el análisis de nuestro segundo modelo teniendo en cuenta las características del flujo del modelo 1, para posteriormente comprobar sus diferencias.

Comenzamos con la gráfica de las líneas de flujo mostrada en la imagen 58, donde vemos que se repite el mismo patrón de flujo que en el caso anterior: el aire se ve acelerado en el contorno del techo del vehículo alcanzando los 60 m/s y en el espacio entre la carretera y el chasis hasta los 50 m/s. Paralelamente, también se aprecia que una separación del flujo en la parte de la superficie de inclinación trasera como sucedía en el caso anterior.

Nuevamente, uno de los aspectos mas reseñable es la turbulencia del flujo que se produce en la parte trasera del vehículo, formándose sendos vórtices como se expone con mayor claridad en la figura 59. A diferencia del modelo 1, aquí ambos vórtices están completamente formados, lo cual influirá negativamente en la sustentación del automóvil.

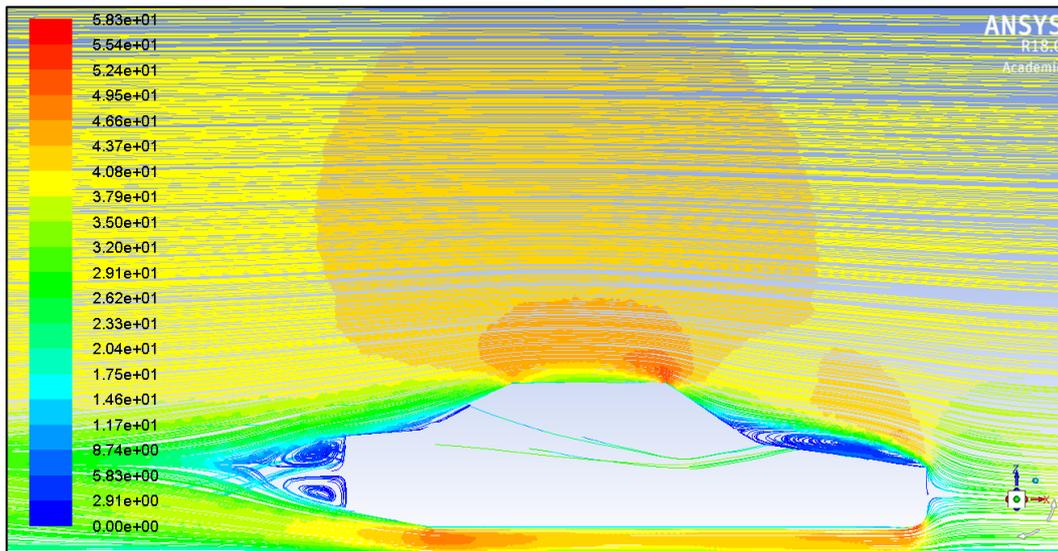


Figura 58. Gráfica de las líneas de corriente (velocidad) para el modelo 2

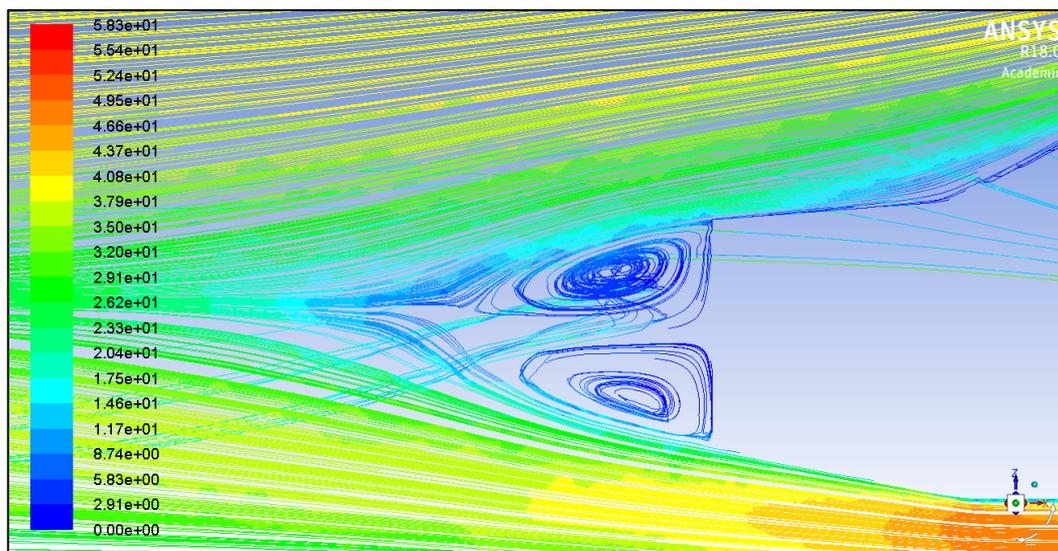


Figura 59. Detalle de los vórtices en la parte trasera del modelo 2

Adicionalmente, se aprecia claramente que en la parte superior del capó se forma otro vórtice, que podemos ver con mayor detalle en la figura 60. Esto supondrá un empuje extra para el vehículo en la dirección del suelo, contribuyendo negativamente a la sustentación del cuerpo.

La suma de estos flujos rotacionales de contribución negativa nos permite explicar la causa de la fuerza de sustentación negativa obtenida en Ansys, así como la diferencia de valor con respecto al modelo 1.

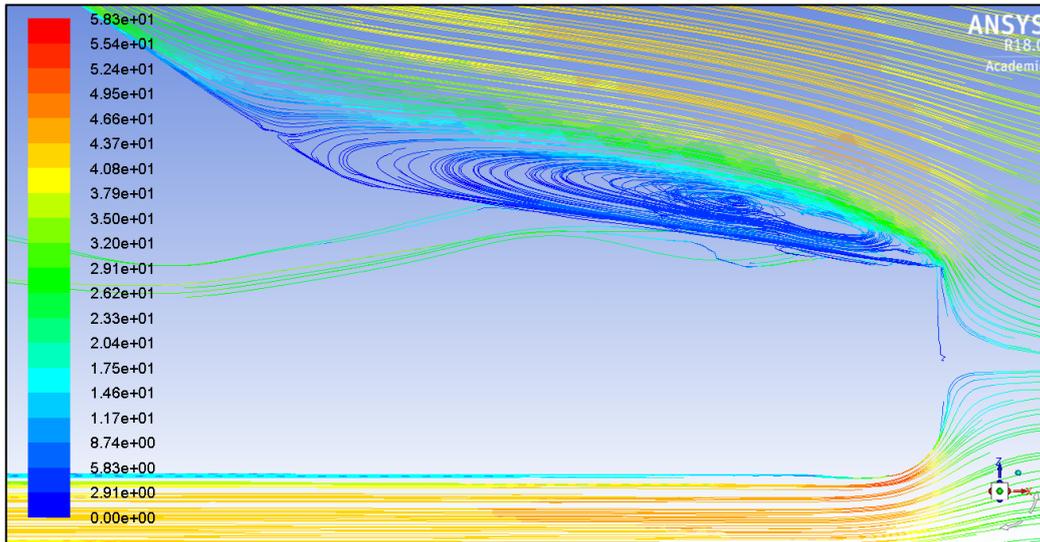


Figura 60. Detalle del vórtice en la parte frontal del modelo 2

Por otro lado, al igual que en el modelo 1 en las zonas donde el aire se ve acelerado, en nuestro caso en el techo y en la separación entre la carretera y los bajos del vehículo, el principio de Bernoulli nos permite explicar el descenso de la presión estática que acontece, como se comprueba en la gráfica 61.

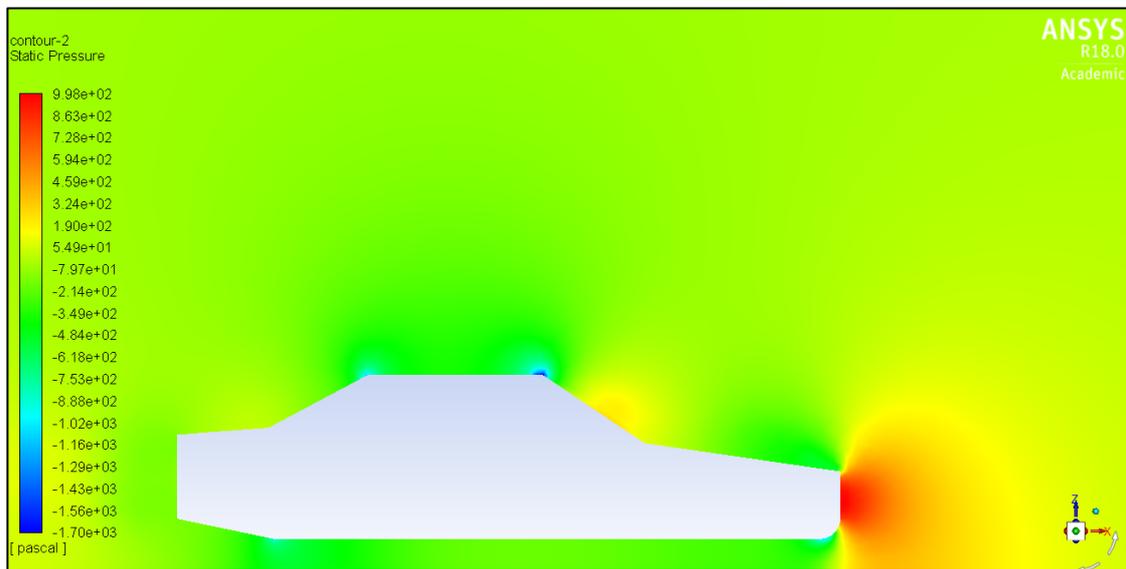


Figura 61. Gráfica de contorno de la presión estática para el modelo 2

Por último, en la figura 62 podemos distinguir el valor de la presión total en las diferentes partes del coche, y tal y como sucedía en el Ahmed body y en el modelo 1, la superficie que soporta una mayor presión es el spoiler delantero alcanzando en este caso los 1.100 Pa, seguida de la luna delantera que soporta unos 400 Pa.

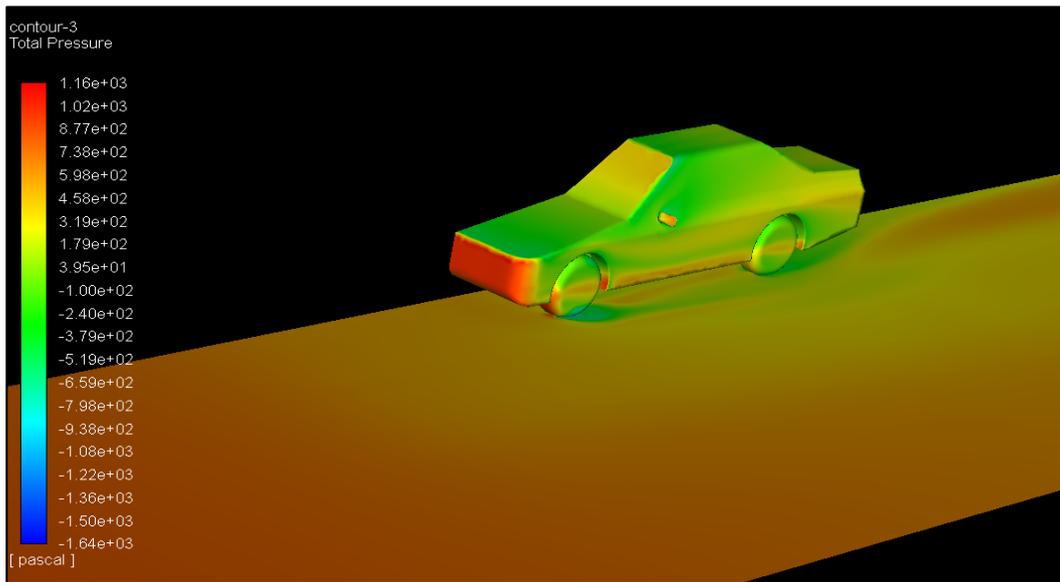


Figura 62. Gráfica de la presión total sobre la superficie del modelo 2

---

## 7 IMPACTO ENERGÉTICO DE LA AERODINÁMICA

En este apartado vamos a analizar a grandes rasgos el impacto que el desarrollo de la aerodinámica tiene en la eficiencia de los automóviles desde una perspectiva de ahorro energético en términos de combustible. Para ello emplearemos los modelos 1 y 2, que cumplen el mismo criterio de diseño y están basados en vehículos con 35 años de separación en su salida al mercado, por lo que puede ser un buen baremo a la hora de analizar la evolución de la industria automovilística en su vertiente aerodinámica.

Para llevar a cabo esta estimación partiremos de los resultados obtenidos para la fuerza de arrastre en ambos modelos. Como se hizo referencia en el apartado 5.2 correspondiente al procedimiento empleado en Fluent, el dominio computacional desarrollado abarca la mitad de nuestros coches, por tanto, los resultados finales de los coeficientes aerodinámicos serán característicos de cada diseño, pero los valores resultantes de la fuerza de arrastre estarán referidos a la mitad de nuestros vehículos, ya que su área proyectada será evidentemente la mitad de la total, y en consecuencia han de ser multiplicados por dos:

$$F_{D1} = 498,58 \text{ N} \qquad F_{D2} = 806,42 \text{ N}$$

En el planteamiento de nuestro proyecto supusimos una velocidad media de desplazamiento para nuestro automóvil de 120 km/h, que es el máximo permitido por la legislación vigente para un turismo. Trasladando este valor a unidades del sistema internacional equivaldría a aproximadamente 33 m/s.

A continuación, multiplicaremos las fuerzas de arrastre de cada modelo por la velocidad media de desplazamiento. Esta operación dará como resultado la potencia consumida por el rozamiento en cada automóvil:

$$P_1 = F_{D1} \cdot v_{media} = 498,58 \cdot 33 = 16.453,14 \text{ W}$$

$$P_2 = F_{D2} \cdot v_{media} = 806,42 \cdot 33 = 26.611,86 \text{ W}$$

Podemos comprobar que hay una diferencia de 10.158,72 W, la cual se puede traducir como ahorro energético en términos de potencia del vehículo. Esto supone la necesidad de que el modelo 2 tenga la capacidad de generar un 50% más de potencia mecánica para vencer al rozamiento con respecto al modelo 1.

El siguiente paso consistirá en tomar una distancia de referencia de 100 km, que nuestro automóvil tardará en recorrer:

$$t = \frac{\text{Distancia}}{v_{\text{media}}} = \frac{100 \text{ km}}{120 \text{ km/h}} = 0,83 \text{ h} = 50 \text{ min}$$

En consecuencia, la energía requerida por cada automóvil para vencer a la fuerza de arrastre del viento durante nuestra distancia de referencia de 100km vendrá dada por las expresiones:

$$E_1 = P_1 \cdot t = 16.453,14 \cdot 50 \cdot 60 = 49,35 \cdot 10^6 \text{ J} = 49,35 \text{ MJ}$$

$$E_2 = P_2 \cdot t = 26.611,86 \cdot 50 \cdot 60 = 79,84 \cdot 10^6 \text{ J} = 79,84 \text{ MJ}$$

Una vez determinada la energía destinada a vencer el rozamiento para cada uno de los modelos considerados, trataremos de determinar el ahorro energético en términos de combustible. Suponiendo que el combustible empleado en ambos casos sea gasolina y teniendo en cuenta que la densidad de esta es de  $\rho = 680 \text{ kg/m}^3$  y su combustión tiene una energía específica de aproximadamente 32 MJ/litro se obtiene:

$$\frac{E_1}{e} = \frac{49,35 \text{ MJ}}{32 \text{ MJ/litro}} = 1,54 \text{ litro}/100\text{km}$$

$$\frac{E_2}{\text{vol}} = \frac{79,84 \text{ MJ}}{32 \text{ MJ/litro}} = 2,5 \text{ litro}/100\text{km}$$

Por lo tanto, la mejora en el aspecto aerodinámico del primer modelo da lugar a un ahorro de aproximadamente un litro de combustible cada 100km con respecto a la energía necesaria para vencer a la fuerza de arrastre.

Teniendo en cuenta que la vida media de un turismo es de aproximadamente 300.000 km y que el precio promedio de la Gasolina 95 durante el año 2019 se sitúa en 1,327 euro/litro, el ahorro económico derivado del diseño será:

$$(2,5 - 1,54) \frac{\text{litro}}{100 \text{ km}} \cdot 300.000 \text{ km} \cdot 1,327 \frac{\text{euro}}{\text{litro}} = 3821,76 \text{ euros}$$

En conclusión, la evolución aerodinámica representada por nuestros modelos supone un considerable ahorro económico para un potencial consumidor estándar y también una gran disminución de las emisiones contaminantes del vehículo hacia la atmósfera.

## 8 CONCLUSIONES

Tras la realización de nuestro proyecto podemos afirmar que los objetivos principales han sido alcanzados satisfactoriamente. Los resultados obtenidos en las diversas simulaciones nos permiten extraer algunas conclusiones que vale la pena destacar.

En primer lugar, como se ve reflejado en los resultados de nuestras simulaciones, la evolución en el diseño de la carrocería de los automóviles con el paso del tiempo buscando cuerpos mas currentilíneos y aerodinámicos, con la finalidad de reducir la resistencia al avance, juega un papel fundamental en aspectos tales como las prestaciones, la estabilidad, la adherencia al suelo, la eficiencia y el consumo de combustible.

Una forma más aerodinámica (suave, sin aristas, redondeada y estrechamiento gradual) unida a unas dimensiones reducidas en altura y en anchura permiten desarrollar coches más eficientes. Determinados tipos de vehículos como furgonetas, monovolúmenes y todoterrenos tienen unos coeficientes aerodinámicos pobres debido a su gran superficie frontal y una forma más difícil de estilizar, sin embargo, cuentan con otro tipo de características compensatorias que los permite tener su espacio en el mercado automovilístico.

Centrándonos ahora en los parámetros aerodinámicos extraídos de ANSYS, la fuerza de arrastre del modelo 2 es aproximadamente un 50% superior con respecto a la del modelo 1. Teniendo en cuenta que durante nuestro proceso de modelado con Fusion 360 nos hemos visto obligados a realizar múltiples simplificaciones geométricas, podemos concluir que un diseño que facilite la circulación del flujo tiene una gran trascendencia en su posterior comportamiento, hecho que se confirma con el reducido valor del coeficiente de arrastre para el modelo 1 ( $C_{D1} = 0,287$ ) con respecto al modelo 2 ( $C_{D2} = 0,413$ ).

Analizando en mayor detalle la descomposición de la fuerza de arrastre, la componente dependiente de la presión, causada por el empuje normal sobre cada superficie, supone cerca del 90% del total en todos los casos. Como explicamos en el apartado correspondiente a la aerodinámica, el arrastre debido a presión se vuelve más significativo cuanto mayor es la diferencia de presión entre las superficies frontal y posterior del cuerpo. En el caso del modelo 1 tenemos una diferencia de presión

---

aproximada de 1100 Pa, mientras que en el modelo 2, tratándose de un cuerpo mas romo, aumenta hasta los 1500 Pa. Esta oscilación en la diferencia de presión sumado a una menor superficie frontal para el modelo 1 nos permite explicar en parte la diferencia de arrastre entre ambos diseños.

La resistencia al avance causada por la viscosidad del fluido, que por consiguiente representará apenas un 10%, puede verse fácilmente reducida mediante la producción de superficies más lisas y la supresión o disminución de los componentes geométricos que sobresalgan en mayor medida, como puede ser el caso de los retrovisores.

Tras examinar los resultados de las diversas simulaciones hemos estimado que la fuerza de sustentación tiene una contribución prácticamente despreciable, ya que es de un orden 30 veces inferior con respecto al peso medio de un turismo estándar. Si estuviéramos evaluando un coche de competición, cada aportación por pequeña que fuera sería de vital importancia para ganar décimas de segundo, pero esto no entra dentro de nuestros objetivos.

Por otro lado, en los diferentes modelos se observa un mismo patrón en los fenómenos del flujo: la parte trasera del automóvil, mas concretamente la estela del mismo, es una zona propensa al flujo turbulento donde tienden a formarse vórtices que supondrán una contribución positiva para la sustentación del vehículo, y paralelamente, el flujo se ve acelerado en los contornos de la parte superior e inferior generando una bajada de presión en estas zonas. Además, las superficies que soportan una mayor presión son las correspondientes a la parte frontal y spoiler delantero, donde chocará la corriente del fluido durante el desplazamiento del coche

Un factor a tener en cuenta en la fase previa de diseño y modelado de cualquier vehículo es el ángulo de ataque, debido a que tiene una influencia directa en la fuerza de arrastre. Si dicho ángulo supera un valor critico generará un desprendimiento del flujo en la parte trasera provocando un aumento de la resistencia al avance y en consecuencia un coeficiente de arrastre deficiente. Por lo tanto, es necesario encontrar un punto de funcionamiento óptimo para este parámetro.

Finalmente, mediante algunos cálculos hemos determinado a grandes rasgos el impacto energético que tiene la aerodinámica de un automóvil, el cual será un indicador práctico de la eficiencia de nuestros diseños. El resultado obtenido concluye

---

que el modelo 2 requiere de aproximadamente un litro mas de combustible cada 100km de desplazamiento para vencer al arrastre del viento. Esto supone un aporte extra del 62,3% y en consecuencia un rendimiento energético notablemente inferior, además de una evidente repercusión económica negativa para el propietario.

En términos generales, podemos concluir que el uso de herramientas computacionales facilita el estudio del comportamiento de nuestro sistema, ampliando el análisis bajo diferentes condiciones, y reduciendo en gran medida tiempo y costes de investigación. No obstante, la realización de ensayos experimentales con modelos reales que verifiquen los resultados obtenidos sigue siendo de vital importancia.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ÇENGEL, Y.A. 2012. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. John M. Cimbala. 2a Edición. México: The McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V.
- [2] MATAIX, C. 1986. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2a Edición. Madrid: Ediciones del Castillo S.A. ISBN 968-6034-29-3.
- [3] Santisteban Díaz, A. 2015. Apuntes del curso 2017-2018 de la asignatura de Mecánica de Fluidos de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales. E.T.S. Ingenieros Industriales y Telecomunicación, Universidad de Cantabria.
- [4] Comsol. 2015. Airflow Over an Ahmed Body. Biblioteca de casos de estudio. [Tutorial de programa] Tutorial de Comsol Multiphysics v.5.0. EEUU
- [5] ANSYS. 2015. ANSYS Fluent Tutorial Guide. [Tutorial de programa] Tutorial de Ansys v.17. U.S.A.
- [6] López Pérez, D. 2015. Análisis del comportamiento aerodinámico de un autobús en condiciones de viento frontal. Carcedo, J; Santisteban Díaz, A. Proyecto final de carrera, Universidad de Cantabria.
- [7] Jiménez Arribas, B. 2015. Estudio mecánico y aerodinámico del comportamiento del alerón trasero de un automóvil. Quesada González, A. Proyecto final de carrera, Universidad Carlos III, Madrid.
- [8] Gómez González, S. 2017. Mallado y simulación CFD de automóvil. Hernández Chiva, E. Proyecto final de carrera, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- [9] Ortego, M. La aerodinámica y la eficiencia: un vistazo a la historia [blog, 2013]: <https://www.diarimotor.com/tecmovia/2013/03/31/aerodinamica-y-eficiencia/>