

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Estudio de posibles mejoras aerodinámicas en moto de competición



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Alumno: Rubén Huarte Martínez

Tutor: Javier León Iriarte

Pamplona, Mayo de 2017

RESUMEN

El estudio aerodinámico en motos de alta competición está dando un salto competitivo a los equipos que apuestan por ello en estos últimos años. Debido a ello, la actual memoria presenta el estudio aerodinámico del carenado de la Honda™ RS por medio del programa de CFD Xflow™. Diseño obtenido anteriormente por medio de la universidad y el cual sirve como base para obtener resultados que más tarde serán verificados. Además, este trabajo trata de obtener resultados principalmente cualitativos y en la medida de lo posible cuantitativos, de mejoras implementadas en dicho carenado verificando así que estos desarrollos aporten beneficios aerodinámicos. Por último, se realizan una serie de descripciones de las posibles mejoras que pueden ser realizadas en el futuro que puedan complementar el trabajo realizado.

PALABRAS CLAVE

CFD, Aerodinámica, Motocicleta

ABSTRACT

The aerodynamic study of high competition motorcycles is giving a competitive jump to the teams that bet for it in the last few years. Because of that, the present report presents the aerodynamic study of the Honda™ RS by the CFD program Xflow™. This design obtained previously through university and which serves as a basis for obtaining results that will later be verified. Furthermore, this research seeks to obtain mostly qualitative but also quantitative results of the improvements implemented in the fairing, while verifying that these developments provide aerodynamic benefits. Finally, a series of descriptions of possible improvements that will be done in the future and can complement the work previously done.

KEYWORDS

CFD, Aerodynamics, Motorcycle

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	11
1.1	Objeto del proyecto	11
1.2	Antecedentes	12
1.3	Restricciones reglamentarias	13
1.3.1	Dimensiones generales de la motocicleta	14
1.3.2	Dimensiones del carenado.....	16
2	FUNDAMENTO TEÓRICO	21
2.1	Fluidos: fundamentos de la aerodinámica	21
2.1.1	Ecuaciones de Navier-Stokes	22
2.1.2	Teorema de Pi-Buckingham.....	22
2.1.3	Principios teóricos de aerodinámica.....	25
2.2	Aerodinámica en motocicletas.....	27
2.2.1	Resistencia aerodinámica	27
2.2.2	Sustentación y centro de presiones	29
2.2.3	Túnel de viento.....	32
2.2.4	Nuevos diseños de carenado.....	35
3	COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS: XFLOW™ 2015.....	41

3.1	Descripción del Software.....	41
3.2	Desarrollo del trabajo (diagrama de flujo).....	51
4	MODELO BASE: HONDA™ RS	55
4.1	Adquisición de la información del carenado	55
4.2	Introducción del archivo en Xflow™	57
4.3	Simulación y resultados: Gráfica de convergencia c_x - nº elementos	60
5	NUEVO MODELO DESARROLLADO	67
5.1	Modificación del modelo en CAD	67
5.1.1	Motocicleta Honda™ RS	68
5.1.2	Piloto	69
5.2	Introducción del archivo a Xflow™	72
5.2.1	Problemas surgidos y soluciones adoptadas	72
5.3	Simulación y resultados.....	76
5.3.1	Convergencia con nuevo modelo fijo	76
5.3.2	Convergencia con nuevo modelo dinámico	79
6	ALERÓN AIRFOIL GOE 462	85
6.1	Dibujo en CAD.....	85
6.2	Gráficas de Airfoiltools.....	87
6.3	Simulación en XFlow.....	89

6.3.1	Gráfica obtenida mediante simulación	89
6.3.2	Conclusiones.....	93
6.4	Instalación del desarrollo en el carenado	94
7	INSTALACIÓN SIMPLE PERFIL GOE-462 EN LATERAL DEL CARENADO.....	97
7.1	Realización del croquis para la instalación.....	97
7.2	Preproceso	100
7.3	Resultados obtenidos	102
7.3.1	Disposición inferior.....	102
7.3.2	Disposición intermedia	103
7.3.3	Disposición superior	104
7.4	Conclusiones.....	105
8	INSTALACIÓN DE PERFIL GOE-462 EN FRONTAL DEL CARENADO.....	109
8.1	Disposición utilizada.....	109
8.2	Preproceso	110
8.3	Resultados de la simulación.....	111
8.4	Conclusiones.....	111
9	CONCLUSIONES	115
9.1	Conclusiones generales	115

9.2	Conclusiones particulares del trabajo realizado	116
9.3	Desarrollos futuros	117
10	BIBLIOGRAFÍA	121

INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

La presente memoria describe el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado; “Estudio de posibles mejoras aerodinámicas en moto de competición”, así como toda la información necesaria para llevarlo a cabo.

El trabajo parte de la inclusión por parte del proyectista, Rubén Huarte Martínez, en el proyecto Motostudent™. Dicho proyecto es un compendio de diseños que deben ser realizados por alumnos de la Universidad Pública de Navarra (promotora del proyecto), para acabar siendo culminados en la construcción de una motocicleta de competición para competir con otras universidades a nivel internacional.

El proyecto realizado conlleva múltiples facetas de trabajo, como pueden ser la organización, comunicación con proveedores, posibles patrocinadores y por supuesto, el diseño de las distintas partes de la moto por parte de los alumnos.

Esta memoria ofrece la descripción del trabajo realizado por parte del proyectista en lo referente al estudio aerodinámico de la motocicleta, obviando todas las demás labores realizadas para el proyecto Motostudent™ de la UPNA por parte de otros compañeros.

1.1 Objeto del proyecto

El objeto del presente proyecto se centra en el estudio y verificación de los parámetros aerodinámicos del carenado de una Honda™ RS mediante el programa Xflow™ 2015 y en la descripción del diseño y desarrollo de nuevas mejoras aerodinámicas aplicadas a dicho carenado.

La idea de desarrollar mejoras aerodinámicas parece sencilla pero es todo un reto en el que son necesarias muchas horas de trabajo. Se utilizará un nuevo programa de CFD, se utilizará también un nuevo método de trabajo como es el de prueba y error, se deberán resolver problemas surgidos a lo largo del

proyecto... Todos estos factores intervendrán en el trabajo del proyectista y darán una nueva visión acerca del trabajo en el área de diseño de producto.

En primer lugar, se parte de un modelo base en CAD del carenado de la moto proporcionado por la universidad, en el que se realizarán los cálculos de convergencia para obtener los parámetros óptimos a introducir en cálculos posteriores.

A continuación, se realizan modificaciones en el archivo, algo que conlleva distintos problemas que deben ser resueltos para obtener una aproximación en el cálculo más cercana a la realidad.

Más tarde, se diseñan nuevas mejoras aerodinámicas para implementarlas en la motocicleta y se realizan las simulaciones sobre el conjunto en los que deben verificar dichas mejoras para dar validez a los nuevos diseños.

Por último, se obtienen tanto las conclusiones generales del trabajo, como las conclusiones particulares del mismo. Además se realizan propuestas de mejora que pueden ser utilizadas en un futuro.

1.2 Antecedentes

El actual proyecto parte, como se ha comentado anteriormente, de la formación del equipo Motostudent™ de la Universidad Pública de Navarra.

Motostudent™ es una competición interuniversitaria cuya principal función es la de que alumnos de distintas universidades obtengan el objetivo de competir en el circuito de Alcañiz, por medio del desarrollo y fabricación de una motocicleta de competición de diseño propio.

El objetivo del equipo de la Universidad Pública de Navarra era el de conseguir desarrollar y producir una motocicleta de competición eléctrica, cuya inclusión en la competición era de reciente adición.

Tras múltiples reuniones a lo largo de Noviembre y Diciembre de 2015, se decide por parte del equipo de alumnos y del profesor que dirige el proyecto Motostudent™, José Sancho, el tomar parte de esta competición e inscribir al equipo en ella.

En estas reuniones, el desarrollo de la aerodinámica de la moto recaía en los alumnos Sergio Alfaro Ezcurra y Rubén Huarte Martínez. El primero de ellos se dedicaría al estudio del carenado utilizado en ediciones anteriores por el equipo Motostudent™ de la universidad.

El segundo proyectista y al que pertenece la presente memoria, partiría de dicho estudio realizado conjuntamente con el compañero y añadiría posibles mejoras que pueden ser implementadas en el futuro si son verificadas no sólo en las simulaciones, sino también en la realidad ya sea en túneles de viento o en la propia pista.

Además de este proyecto, los distintos alumnos componentes del equipo dedicarían tiempo a la organización de todos los departamentos, la búsqueda de patrocinadores por medio de reuniones o llamadas telefónicas a los posibles interesados en apoyar el proyecto.

1.3 Restricciones reglamentarias

La Organización establece un reglamento técnico que contiene la normativa técnica reguladora de la competición. Con él se pretende estandarizar y acotar la gran variedad de posibilidades que existe en la construcción de un prototipo de moto de competición. De este modo todos los proyectos presentados por las diferentes universidades inscritas en la competición se ajustarán a una línea de trabajo orientativa y común, posibilitando una competencia objetiva entre los participantes.

Las restricciones reglamentarias aplicadas al actual proyecto serán las propias de las dimensiones de la motocicleta y las del carenado.

1.3.1 Dimensiones generales de la motocicleta

Las dimensiones de la motocicleta son libres exceptuando algunos requisitos básicos:

- La anchura mínima entre los extremos de los semimanillares ha de ser de 450 mm. **Figura 1**

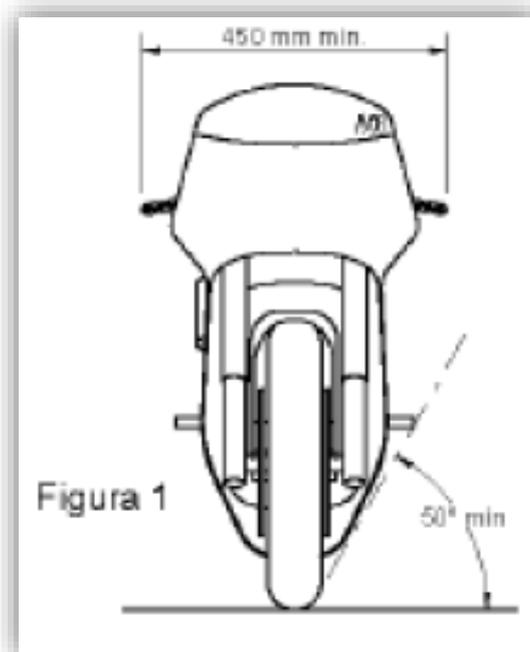


Figura 1: dimensiones de la moto – vista frontal

- El ángulo mínimo de inclinación lateral de la motocicleta sin que ningún elemento de la misma toque el pavimento debe ser 50°. Dicha medición se realiza con la motocicleta descargada pero con todo el equipamiento y líquidos para su funcionamiento. **Figura 1**
- La distancia libre al pavimento con la motocicleta en posición vertical ha de ser de un mínimo de 100 mm en cualquier situación de compresión de suspensiones y reglajes de geometrías. **Figura 2**
- Limite posterior: Ningún elemento de la motocicleta podrá rebasar la línea tangente vertical trazada a la circunferencia exterior del neumático trasero.

- La distancia de los neumáticos a cualquier elemento de la motocicleta diferente de la rueda no podrá ser inferior a 15 mm en toda posición de la misma y reglaje de geometría.

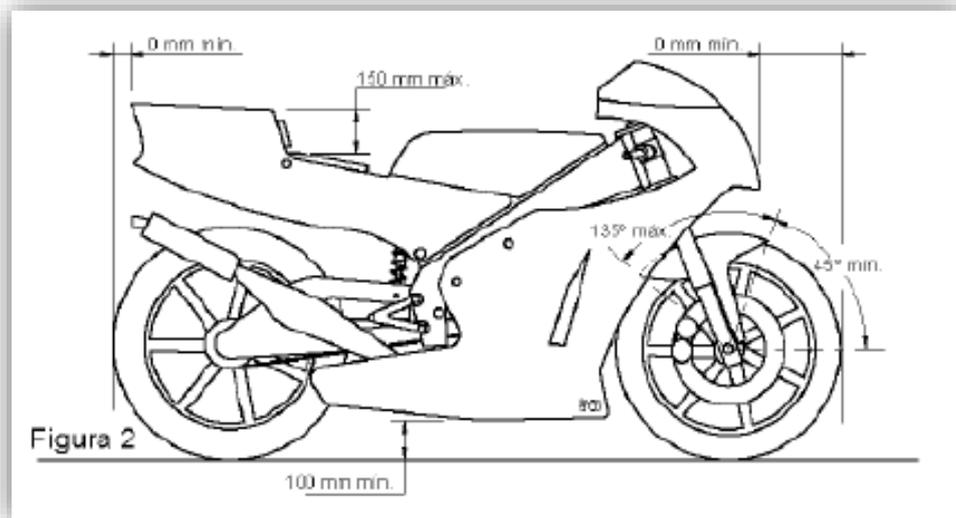


Figura 2: dimensiones de la moto – vista lateral

- La anchura máxima del asiento debe ser de 450 mm. No podrá sobresalir de esa anchura ningún otro elemento de la motocicleta del asiento hacia detrás excepto el sistema de escape.

1.3.2 Dimensiones del carenado

El carenado tiene las siguientes restricciones:

- Todos los bordes y acabados del carenado han de ser redondeados. Radio mínimo 1 mm.
- La anchura máxima del carenado será de 600 mm. **Figura 3**

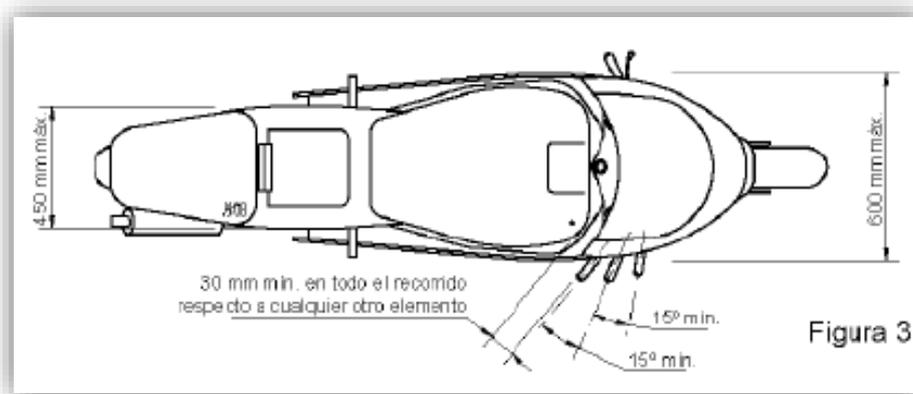


Figura 3: dimensiones del carenado

- Límite frontal: el carenado en ningún caso podrá sobrepasar la vertical frontal trazada tangencialmente a la circunferencia exterior del neumático delantero.
- Límite posterior: el carenado en ningún caso podrá sobrepasar la vertical posterior trazada tangencialmente a la circunferencia exterior del neumático trasero.
- Lateralmente: El carenado no podrá cubrir lateralmente al piloto a excepción de los antebrazos (esta excepción solamente en posición de mínima resistencia aerodinámica del piloto). La llanta posterior no podrá cubrir-se en más de 180°.
- Entre la altura del asiento y la parte más elevada del colín la cota máxima será de 150 mm.
- La utilización de guardabarros no es obligatoria.

- El guardabarros delantero no podrá cubrir más de 135° de la circunferencia del neumático medido desde la parte posterior del neumático con origen del ángulo en la horizontal que pasa por el eje de rueda. En esos 135° las dimensiones del guardabarros son libres.
- Está permitido el uso de alerones como pieza del carenado. Deberán no superar la anchura del carenado o del colín ni superar la altura de los extremos del manillar. El radio mínimo será de 2 mm. Se permite el uso de dispositivos móviles aerodinámicos.

FUNDAMENTO TEÓRICO

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

En este apartado, se explica la base teórica de la que va a partir todo lo que resta de proyecto. Primero se explican los fundamentos de la mecánica de fluidos en el caso del aire como fluido de trabajo y cómo se trabaja en el caso de no hacerlo con aire. Después, se expondrán los estudios y avances producidos a lo largo del tiempo en lo respectivo a la aerodinámica de motocicletas.

2.1 Fluidos: fundamentos de la aerodinámica

El término fluido se puede definir como un tipo de medio continuo, cuyo comportamiento frente a un esfuerzo cortante es el de deformarse de forma continua mientras perdure el esfuerzo aplicado [1, pag-33].

La mecánica de fluidos, es la ciencia que estudia este tipo de medio. Debido a ello, desde el punto de vista de la mecánica de fluidos existen solo dos estados:

- Sólido: su forma es “invariable” a todos los efectos.
- Fluido: este medio también se divide en dos tipos
 - Líquido: ocupan un volumen fijo dentro del recipiente que los contiene.
 - Gas: tienden a ocupar todo el volumen disponible.

El movimiento de las moléculas en líquidos y gases tiene un comportamiento físico similar (denominado: dinámica de fluidos), muy diferente del que se tiene en sólidos.

Este proyecto va a incidir en el movimiento de las moléculas del aire frente a un obstáculo, en este caso una motocicleta, que producirá unos efectos sobre dicho objeto y también producirá cambios observables en la trayectoria y comportamiento del aire.

2.1.1 Ecuaciones de Navier-Stokes

Para conocer el movimiento de un fluido [1], es necesario conocer 4 magnitudes: el vector velocidad del fluido (en sus 3 componentes), la presión, la densidad y la temperatura del mismo, en todos los puntos del espacio que ocupa y en todo instante de tiempo. Por lo tanto, se tienen 6 incógnitas que dan a conocer el movimiento del fluido en su totalidad.

Estas magnitudes, están gobernadas por las ecuaciones de **Navier-Stokes**, que son un conjunto de 3 ecuaciones en derivadas parciales, de segundo orden, no lineales y que están acopladas (todas las incógnitas aparecen en todas las ecuaciones).

Las ecuaciones mencionadas, necesitan de unas **condiciones iniciales** y de unas **condiciones de contorno** para poder obtener la solución particular al problema planteado.

Como se ha comentado anteriormente, el proyecto actual utiliza un programa de CFD para obtener mediante métodos numéricos la solución a las ecuaciones planteadas.

Por ello, la importancia del proyectista en este trabajo se encuentra en analizar y aplicar las condiciones iniciales y de contorno, adecuadas para que las soluciones obtenidas puedan darse como válidas.

2.1.2 Teorema de Pi-Buckingham

Para poder relacionar los resultados entre un modelo teórico simulado en CFD y un prototipo real que va a llevarse a cabo, se utiliza el Teorema de Pi-Buckingham, que es el teorema fundamental del análisis dimensional, que permite cambiar el conjunto original de parámetros de entrada dimensionales de un problema físico por otro conjunto de parámetros de entrada adimensionales más reducido.

El Teorema de Pi-Buckingham se puede expresar como:

“Si un proceso físico satisface el principio de homogeneidad dimensional y relaciona n variables dimensionales, se puede describir mediante una relación entre solo k variables adimensionales, siendo $j=(n-k)$ el máximo número de variables que no pueden formar grupo adimensional entre ellas.”

El principio de homogeneidad dimensional, en resumen dice que sólo es posible sumar o restar magnitudes que sean de la misma naturaleza, es decir, que tengan las mismas “dimensiones”

Mediante este teorema, se obtienen los distintos números adimensionales que caracterizan el fluido que se va a utilizar.

Además, se obtiene una relación entre modelo y prototipo mediante la semejanza dinámica. Existe semejanza dinámica cuando modelo y prototipo tienen la misma relación de escala de longitudes, la misma relación de escala de tiempos y la misma relación de escala de fuerzas (o de masa), es decir, la semejanza dinámica (fuerzas) implica que exista semejanza geométrica (longitudes) y cinemática (tiempos).

La definición de semejanza es la siguiente:

“Las condiciones del flujo para un modelo de ensayo son completamente semejantes a las del prototipo si los valores correspondientes al modelo y prototipo coinciden para todos los parámetros adimensionales.”

La semejanza dinámica es un punto clave en los túneles de viento. Si un cuerpo (coche, avión, molino, etc) es estudiado a escala en un túnel de viento, los coeficientes adimensionales de sustentación, arrastre y momento son los mismos que para dicho cuerpo ante un flujo libre externo.

– Números adimensionales: Número de Reynolds

Mediante el teorema explicado anteriormente, se obtienen los números adimensionales que caracterizan a un fluido. Entre los números adimensionales que se pueden obtener mediante este proceso se encuentran los siguientes:

$$\text{Número de Euler} = \frac{P}{\rho \cdot U^2}$$

$$\text{Número de Weber} = \frac{l \cdot \rho \cdot U}{\mu}$$

$$\text{Número de Mach} = \frac{U}{a}$$

$$\text{Número de Froude} = \frac{U^2}{l \cdot g}$$

Además de estos y muchos otros números adimensionales, existe uno de ellos que tiene una influencia diferencial dentro de los fluidos en general y dentro de este proyecto en particular. Ese número es el número de Reynolds. Este número adimensional caracteriza el estado del fluido en movimiento, ya que en él interviene tanto la velocidad, como la densidad y la viscosidad del mismo.

Viene expresado de la siguiente manera:

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

Siendo:

ρ : densidad del fluido

v : velocidad del fluido

L : longitud característica del objeto a estudiar

μ : viscosidad dinámica del fluido

En general, con números de Reynolds cuyo valor sea $Re = 10^3$ o menor, se considera flujo laminar del fluido y con números mayores se considera flujo turbulento. El flujo laminar, tiene como característica principal que las líneas de

corriente del flujo están ordenadas, estratificadas y suaves. Mientras tanto, en el flujo turbulento las partículas de fluido se mueven de forma caótica, formando pequeños remolinos periódicos llamados turbulencias.

2.1.3 Principios teóricos de aerodinámica

– Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli explicado de forma simplificada dice que cuando aumenta la velocidad de un fluido, disminuye la presión que dicho fluido ejerce sobre la superficie que lo atraviesa.

Este principio se basa en la ecuación de la energía, cuya expresión dice que el sumatorio de las energías debidas a la presión, a la cinética del movimiento y a la potencial, deben permanecer constantes.

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = cte$$

Siendo:

P: Presión en un instante concreto

ρ : densidad del fluido

v: velocidad del fluido

g: aceleración de la gravedad

h: altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia

El teorema de Bernoulli explica, por ejemplo, la fuerza de sustentación que actúa sobre el ala de un avión en vuelo. Un ala (o plano aerodinámico) está diseñada de forma que el aire fluya más rápidamente sobre la superficie superior que sobre la inferior, lo que provoca una disminución de presión en la superficie superior con respecto a la inferior. Esta diferencia de presiones produce la fuerza de sustentación que permite al avión despegar y mantenerse en el aire.

– Teoría de la capa límite

Como ya se ha comentado, el fluido modifica su movimiento debido a la aparición de un obstáculo en medio de su trayectoria, además, en este proceso de variación del movimiento se produce una fricción con el objeto debida a la viscosidad.

La capa límite se entiende como aquella en la que la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada.

Esta capa límite, puede ser tanto laminar como turbulenta; aunque también pueden coexistir en ella zonas de ambos tipos de flujo.

Cuando el flujo es divergente, el gradiente de velocidad en la pared va disminuyendo y con él el esfuerzo cortante, puede ocurrir que incluso llegue a anularse. En tal caso, el flujo se separaría de la pared produciéndose el **desprendimiento de la capa límite** como se puede observar en la **Figura 4**. Este desprendimiento, produce que se formen estelas y una alteración del campo de presiones, lo que conlleva una disminución de la sustentación y un aumento de la resistencia aerodinámica.

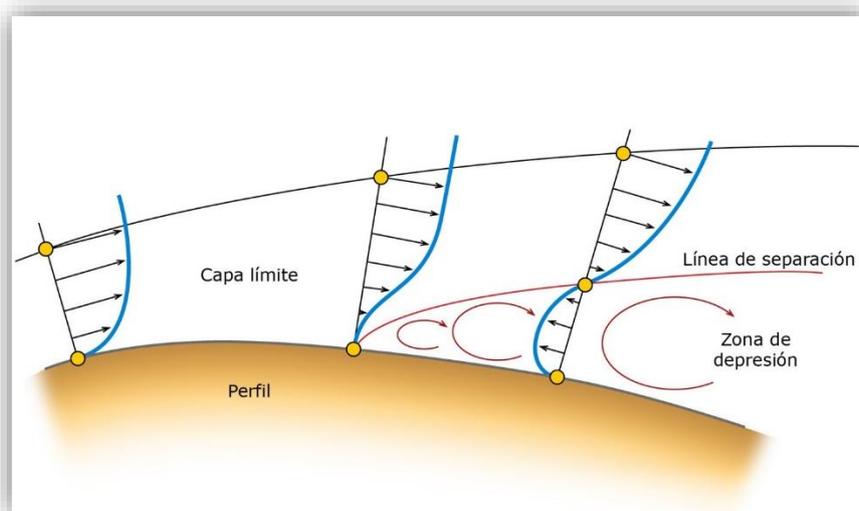


Figura 4: Desarrollo de la capa límite y desprendimiento final

En ocasiones es de utilidad que la capa límite sea turbulenta desde el inicio ya que ésta permanecerá adherida al perfil un mayor periodo de tiempo, y así evitar el aumento de resistencia aerodinámica y la disminución de la sustentación.

2.2 Aerodinámica en motocicletas

El proyecto actual, como se ha comentado con anterioridad, va a consistir en utilizar los resultados obtenidos en el cálculo de CFD para analizar el actual carenado, y también para implementar posibles mejoras aerodinámicas parciales. Es decir, obtener una mejora parcial, en algo que se ha planteado mejorar, pese a que pueda tener unos efectos secundarios no muy graves en otro apartado de estudio. Se va a realizar así debido a que en otro caso, sería necesario que múltiples disciplinas trabajaran en común, y este no es el objetivo inicial.

En este apartado, se explican de forma resumida los apartados más importantes que van a aparecer a lo largo de todo el proyecto en lo referente a la aerodinámica en motocicletas.

2.2.1 Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica, es la fuerza producida por la variación de presión entre la parte delantera y la parte trasera de un vehículo que se abre paso en un fluido. Esta fuerza se opone al movimiento y a altas velocidades es la fuerza que roba mayor potencia al motor. Esta potencia del rozamiento del aire viene expresada por una función cuyo valor de la velocidad viene expresado al cubo, por lo que tiene la mayor influencia entre las existentes, a altas velocidades.

El parámetro causante de esta diferencia de presiones entre la parte delantera y trasera del vehículo, es la viscosidad. El aire en las cercanías de la motocicleta, disminuye su velocidad como se ha explicado en la teoría de la capa límite. Además de producirse en algún momento del tránsito por el carenado, la

rotura de dicha capa límite lo que produce un aumento de la resistencia aerodinámica.

La fuerza de resistencia aerodinámica viene dada por la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_d \cdot A$$

Siendo:

ρ : densidad del fluido

v : velocidad relativa del fluido respecto al objeto a estudiar

c_d : coeficiente de resistencia aerodinámica del objeto

A : área frontal del objeto a estudiar (suponiendo que el fluido pega de frente)

Como se puede observar, la fuerza aerodinámica depende tanto de la densidad del aire como de la velocidad a la que se produce el movimiento relativo entre el objeto y el propio aire. Pero además, existen dos parámetros más que son en los que se puede intervenir por medio de los distintos diseños para que el aire ejerza una fuerza menor de la prevista en el objeto a estudiar.

El factor de área utilizado en la ecuación es el área frontal del objeto a estudiar, ya que es el área que observa el fluido cuando llega hacia el objeto.

El coeficiente presente en la ecuación es el coeficiente de arrastre o **drag coefficient**. Este coeficiente es un valor adimensional que se utiliza para cuantificar el arrastre de un objeto en un medio fluido, en este caso el aire.

En el caso de las motocicletas, este coeficiente ha sido estudiado para múltiples carenados. Pero normalmente, el coeficiente de arrastre siempre está asociado a una superficie de referencia, por lo que los coeficientes de arrastre presentes en tablas de libros especializados [3] hacen referencia al coeficiente de arrastre multiplicado por el área. Este coeficiente es nombrado como C_{DA} .

La tabla obtenida del libro de la referencia [3] es la expuesta en la **Tabla 1**:

Motocicleta	Piloto tumbado	Piloto sentado
Yamaha Venture		0,75
Honda V65 Magna		0,61
Honda Blackbird	0,44 / 0,49	0,72 / 0,81
Honda VF1000F	0,40	0,46 / 0,45
Aprilia Mille	0,52	0,61
Ducati 916	0,49 / 0,57 / 0,53	0,61 / 0,69 / 0,61
BMW R1100 RT	0,53	0,97
BMW K100RS	0,40	0,43
Yamaha R1 (1998)	0,57	0,62
Yamaha FJ1100	0,43	0,48
Kawasaki GPZ900R	0,36	0,43
Suzuki GSX 1100EF	0,41	0,44
Suzuki GSXR750	0,32	
Suzuki Hayabusa	0,31	
Kawasaki ZX-12R	0,34	
Yamaha OW69	0,32	
Honda 1996 RS 125	0,20	
Honda 1990 RS 125	0,19	
Honda RS500	0,24	
Rifle faired Yamaha	0,15	

Tabla 1: Coeficientes de arrastre por área frontal de distintos carenados de moto

Ésta tabla, se toma como referencia para comprobar que los valores del coeficiente en la simulación obtenidos sean similares. La moto a estudiar es la Honda™ RS500 presente en la tabla anterior. Es decir, el producto del coeficiente de arrastre obtenido en la simulación y el área frontal de referencia, se compara y verifica con el valor obtenido de la tabla mostrada anteriormente.

2.2.2 Sustentación y centro de presiones

De la misma forma que agrupamos juntas las diversas masas de una motocicleta en un punto equivalente que llamamos Centro de Masas o Centro de Gravedad, podemos hacer lo mismo con las fuerzas aerodinámicas. Tanto si miramos de frente como si lo hacemos de lado, existirá un punto a través del cual actuará la fuerza total.

Este punto se llama **Centro de Presiones (CdP)**. La fuerza resultante se puede descomponer en una componente vertical y otra horizontal. Si la moto no es simétrica lateralmente o existe algún viento lateral, entonces también existirá una componente lateral. La parte longitudinal (de adelante a atrás) de la componente horizontal representa la fuerza de resistencia aerodinámica, mientras que la componente vertical representa la fuerza de **sustentación**, que puede ser positiva o negativa, dependiendo del sentido que tenga.

La fuerza de sustentación es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, en dirección perpendicular a la de la velocidad de corriente incidente. Esta fuerza de sustentación también llamada **Lift**, es calculada por medio de la simulación en este trabajo, aunque puede ser obtenida por medio de sensores en los túneles de viento.

Esta fuerza procede de una diferencia de presiones entre las dos zonas por las que circula el aire al imponerse un objeto en su trayectoria. Es decir, si el aire que discurre por la parte superior de un objeto tiene una mayor trayectoria que realizar respecto a la inferior, tiene como efecto que la velocidad en dicha trayectoria superior es mayor por lo que la presión producida en ese lugar será menor. En cambio en la parte opuesta ocurrirá lo contrario, la velocidad será menor y la presión tendrá un mayor valor en comparación con la zona perteneciente a la trayectoria superior, produciéndose de esta manera la fuerza de sustentación en dirección vertical y con sentido desde la zona de mayor presión (trayectoria inferior del flujo), hacia la zona de menor presión (trayectoria superior del flujo).

La ecuación de la fuerza de sustentación se expresa de la siguiente manera:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_L \cdot A$$

Como se puede observar, los parámetros presentes en la ecuación son los mismos que en la fuerza de arrastre, con la única diferencia de que en la actual ecuación presenta un coeficiente distinto, en este caso el de sustentación o Lift.

En lo que se refiere a los coches, son conocidos los nuevos desarrollos y novedades para la mejora del “efecto suelo” que se produce al aumentar la sustentación negativa, pegando más el coche al suelo y de esta forma poder aumentar la velocidad de entrada en curva.

Sin embargo, la fuerza de sustentación en motocicletas, no ha tenido gran relevancia a lo largo de la historia. Esto es debido a que la moto es inclinada en el paso por curva, y la fuerza producida por un desarrollo que mejora la sustentación en recta, en el caso de estar con la moto inclinada en curva puede ser perjudicial.

Como se puede observar en la **Figura 5**, la moto tiene implementados dos perfiles que producen sustentación. La fuerza de sustentación expuesta en la **Figura 5** se opone al giro que quiere realizar la moto en la curva por lo que en para este tipo de trayectorias tiene efectos negativos.

Por tanto, hay que evitar en la medida de lo posible estos efectos negativos que se producen en curva, para ello es necesario un trabajo añadido que permita centrarse en el estudio en curva de dichos elementos implementados en la motocicleta.

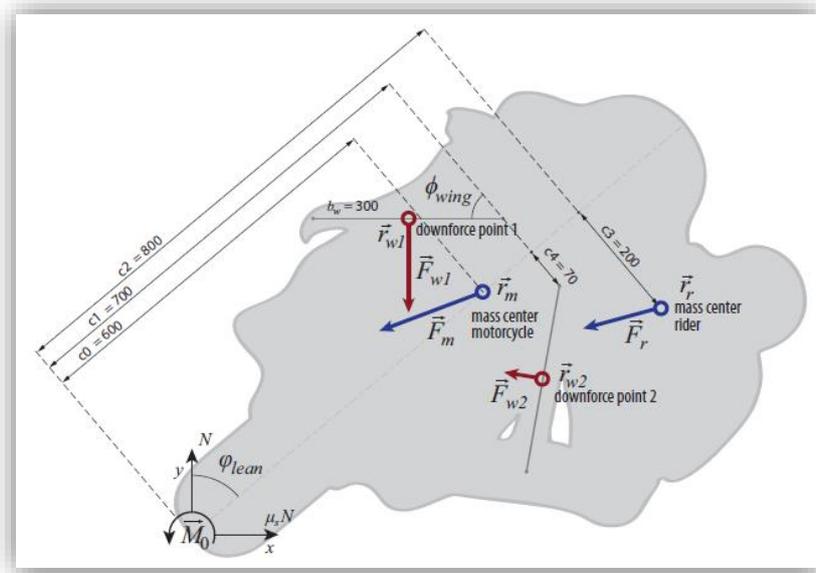


Figura 5: figura representativa del efecto perjudicial de la sustentación en curva

Sin embargo, si esta fuerza es de pequeña magnitud, el efecto negativo es despreciable respecto al resultado que se quiere conseguir, por lo que el estudio realizado para este tipo de diseños cuyas fuerzas son de pequeña magnitud únicamente se realiza en recta.

Por el motivo ya comentado, en los últimos años se ha visto un pequeño cambio en la idea de que la sustentación sea siempre perjudicial en el mundo de las dos ruedas, y equipos de alta competición han desarrollado innovaciones en este sentido que les han dado un salto de calidad respecto a otras marcas. Estas novedades se exponen en el último apartado “nuevos diseños de carenado”.

En el actual proyecto, la sustentación va a adquirir un papel relevante ya que una de las mejoras a realizar es la obtención de unos resultados que verifiquen la calidad de los nuevos desarrollos planteados por las grandes marcas de motociclismo.

2.2.3 Túnel de viento

El cálculo de los parámetros mediante CFD es una manera de conocer de forma analítica las fuerzas, momentos y variaciones de trayectoria producidas

por el fluido frente a un obstáculo. Pero existen también otras fórmulas de trabajo complementarias a las simulaciones, como el **túnel de viento**, un método que por medio de la introducción de prototipos reales o bien a escala, obtiene los parámetros aerodinámicos al igual que en CFD. Por ello, pueden verificarse los resultados comparando ambos métodos y por ello son complementarios.

Un túnel de viento es una herramienta mediante la cual se experimenta de forma real las condiciones de movimiento de un fluido frente a al elemento de estudio.

Los túneles de viento, propulsan un gas (normalmente aire) a través de un conducto en el que se encuentra fijo el elemento a estudiar. Se puede utilizar tanto la escala 1:1 como otro tipo de escalas entre el modelo a estudiar en el túnel y el prototipo real.

Normalmente, los túneles a escala 1:1 son muy caros de construir y utilizar, por lo que se suelen utilizar otras escalas e incluso otro tipo de túneles (fluido utilizado agua p.e), para obtener los resultados adecuados de forma económicamente más asequible. Este tipo de túneles, utilizan la **semejanza dinámica** para extrapolar los resultados del túnel con sus características (escalas, rugosidades, tipo de fluido utilizado...) a la realidad.

Sin embargo, existen también deficiencias en este tipo de experimentación, ya que en lo que respecta a este proyecto, una motocicleta para obtener unos resultados reales debería no estar fija en el túnel, sino avanzar respecto al aire y no al revés, ya que en el primer caso las ruedas no giran respecto al suelo. Para aproximar el experimento a esta situación, se diseñan también túneles con suelo móvil (**Figura 6**), que permite girar las ruedas asemejando de esta forma algo más a la realidad, pese a como se puede observar en la figura, el viento también varía su perfil de velocidades respecto al suelo comparado a como lo haría en la realidad.

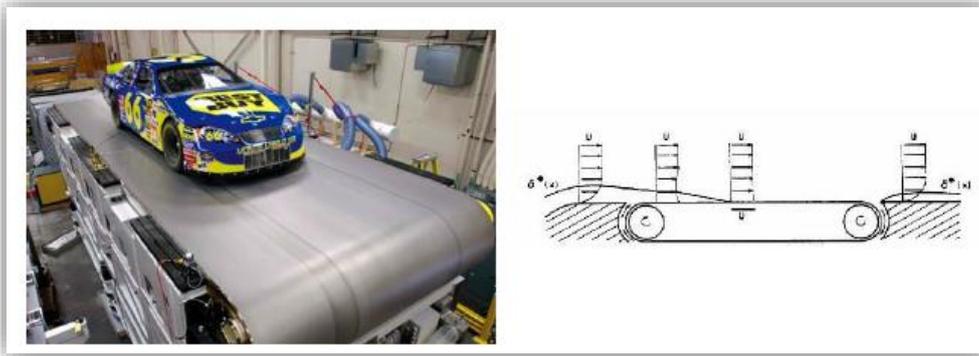


Figura 6: imagen del suelo móvil en túnel de viento y del perfil de velocidades generado

Para analizar los resultados se emplean varios métodos. Por una parte estarán los análisis cuantitativos, es decir, fuerzas y momentos generados en el vehículo que se obtendrán mediante dispositivos preparados para ello, obteniendo a partir de ellos los parámetros como los coeficientes aerodinámicos. Por otro lado, estará el análisis cualitativo, que se hará mediante un análisis visual, donde se podrá ver como es el recorrido del flujo, donde se generan turbulencias, etc.

Este último método es usado también para análisis experimentales en la propia pista de competición. Es habitual ver en los entrenamientos de Fórmula 1™ (**Figura 7**) el uso de parafina en la superficie del monoplaza para comprobar que por ejemplo las líneas de corriente que tenían previsto que siguiera el aire en el CFD lo hagan también en la realidad.



Figura 7: imagen de la utilización de parafina en F1 para verificación de estudios aerodinámicos

2.2.4 Nuevos diseños de carenado

La aerodinámica en el motociclismo siempre ha sido un factor con un importante valor para los ingenieros al desarrollar los nuevos prototipos. Por ello, a lo largo de la historia se han realizado distintos modelos de carenado de los cuales se exponen los nuevos diseños propuestos por las grandes marcas en este apartado de la memoria.

Se han realizado nuevos diseños tanto sobre el carenado (frontal, lateral y colín), como implementaciones de perfiles alares, tanto interiores como exteriores en el propio carenado de la motocicleta.

Los diseños del carenado están orientados a la disminución del coeficiente aerodinámico, mientras que las nuevas alas implementadas están diseñadas

para aumentar la sustentación cuando la moto acelera de forma brusca a la salida de las curvas.

El ejemplo más claro de que estos diseños han aportado mejoras palpables en la alta competición es el del equipo Ducati™, que implantó unos grandes alerones en la parte delantera del carenado (**Figura 8**) y que los demás equipos poco tardaron en adaptarlos a sus propios carenados.



Figura 8: alerones implantados en el carenado de la Ducati™ Desmo16 GP

En la actual temporada, la 17-18, se han implantado rigurosas normativas respecto a los diseños de los alerones. En principio están prohibidos todo tipo de alerones que no formen parte del carenado y tampoco pueden sobresalir del mismo. Pese a ello, los distintos equipos del mundial con los resultados obtenidos la temporada anterior con estas mejoras aerodinámicas no han cejado en esfuerzo para eludir dicha normativa y han diseñado distintos desarrollos que a priori les aportan mejoras aerodinámicas semejantes a las de la temporada anterior.

Este tipo de desarrollos se pueden observar tanto en la **Figura 9** como en la **Figura 10**, ambas pertenecientes a dos de las grandes marcas de la competición de motociclismo.



Figura 9: nuevo carenado desarrollado por Ducati™



Figura 10: vista del carenado de Yamaha™ con alerones interiores

Como se puede observar en las imágenes anteriores, los equipos de motociclismo de alta competición no han dejado de evolucionar la aerodinámica de las motos a pesar de las limitaciones de seguridad impuestas que evitan colocar alerones externos en los carenados de las motos. Sí permite el reglamento, colocar alerones interiores o que el propio carenado incorpore los beneficios aerodinámicos sin implementar elementos externos.

COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS: XFLOW™ 2015

3 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS: XFLOW™ 2015

El cálculo de las ecuaciones de Navier-Stokes es de muy difícil resolución para el tipo de problemas que se realizan en este proyecto. Pero gracias a programas de dinámica de fluidos computacional (CFD en inglés), se consiguen realizar simulaciones que aproximan los resultados a la realidad de forma veraz.

El software de CFD utilizado para este proyecto es el Xflow™ 2015, que realiza un análisis Lagrangeano y cuyo funcionamiento se explica en el siguiente apartado.

El último subapartado hace referencia al diagrama de flujo del trabajo realizado en este proyecto. Es un esquema de los pasos seguidos a lo largo del proyecto para llegar al objetivo propuesto en el mismo.

3.1 Descripción del Software

El software utilizado, podría resumir su funcionamiento en que es importado un objeto en el formato adecuado (.Step, .STL etc) y el propio programa realiza el mallado sobre él, según unos parámetros que especifica el propio usuario. A continuación, el programa por medio de extrapolaciones estadísticas de las ecuaciones de dinámica de fluidos obtiene los parámetros aerodinámicos de la simulación. En general, cuanto más fino sea el mallado, mejores son los resultados obtenidos pero también el tiempo de cálculo es inversamente proporcional a la disminución del tamaño de elemento. A menor tamaño, mayor tiempo de cálculo. En ocasiones no es necesario realizar pequeños tamaños de malla para obtener un resultado aceptable, la optimización del mallado es uno de los trabajos de ingeniería a realizar.

El comando ***Import a new geometry*** permite importar un objeto diseñado en otro programa pero que como ya se ha comentado debe estar guardado en formato STEP, STL o formatos similares.

En cuanto al menú propio de la simulación o **Project tree** existen los siguientes apartados:

- Environment

En este menú, como se puede observar en la **Figura 11**, se introducen las principales condiciones de contorno y condiciones iniciales de la simulación.

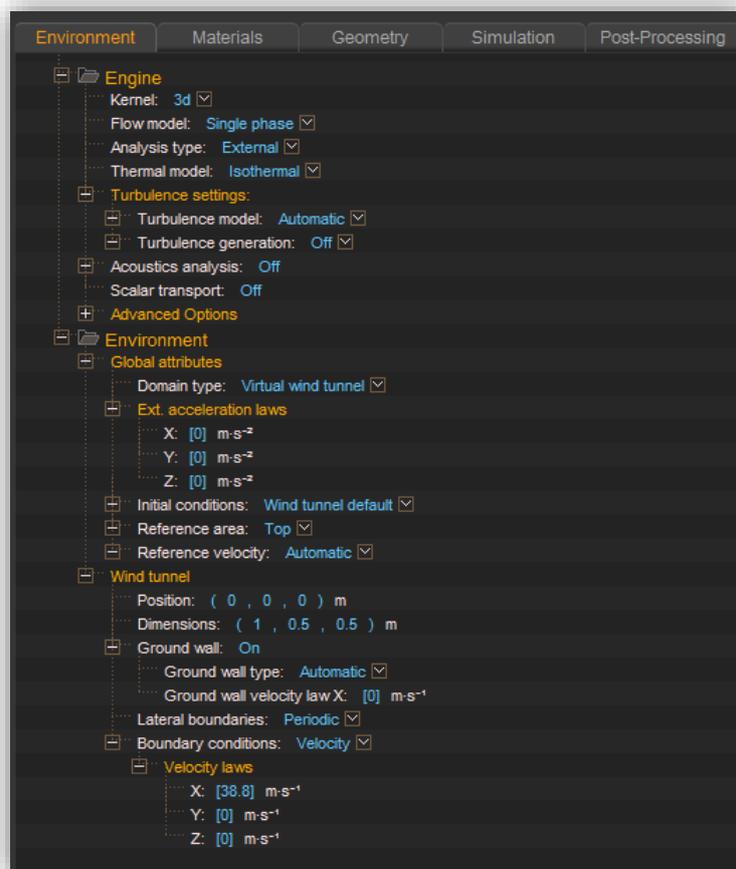


Figura 11: ventana Environment

En la ventana **Engine**, es modelizado el flujo de aire y el modelo de turbulencia. En general, para este proyecto se utiliza un flujo tridimensional, externo e isoterma, además de obviarse el análisis acústico y tomarse un modelo de turbulencia automático.

Este modelo de turbulencia toma de forma automática el modelo de turbulencia “**Wall-Adapting Local Eddy**”(WALE). El modelo **WALE**, tiene

buenas propiedades tanto para las zonas cercanas como para las zonas alejadas del objeto a estudiar y sirve para flujos laminares y turbulentos. Este modelo recupera el comportamiento asintótico de la capa límite turbulenta cuando esta capa puede ser directamente resuelta y no añade viscosidad turbulenta artificial en las regiones de cizallamiento fuera de la estela.

La ventana **Environment** indica las condiciones iniciales del viento como su velocidad, y además introduce las geometrías del túnel de viento y la posible adición de suelo móvil o fijo, en el mismo.

Túnel de viento virtual

El túnel de viento tanto en situaciones reales como en las simulaciones que se realizarán en este trabajo, está caracterizado por dos parámetros [2,pag.635]:

➤ Ratio de bloqueo

El primero de ellos es el ratio de bloqueo o “*blockage ratio*” que relaciona la sección de paso del flujo en el túnel y el área de referencia del vehículo a estudiar. Este ratio de bloqueo (φ), toma el valor de 0,1 para túneles de viento de estudio e vehículos y viene expresado de la siguiente manera:

$$\varphi = \frac{A}{A_N}$$

Siendo:

A : *área de referencia del vehículo a estudiar*

A_N = *sección de paso del flujo de aire en el túnel de viento*

También existe un ratio entre la altura y la anchura del túnel de viento que es de 0,66. Se toman los valores de 4 m de altura del túnel y de 6 m de anchura del túnel, que cumplen con el ratio de 0,66.

Además, es conocida el área de referencia de la motocicleta a estudiar que es de $0,427 \text{ m}^2$. Por tanto, se puede verificar el área de la sección de paso que va a utilizarse por medio de los valores del ratio (0,1) y del área de referencia ($0,427 \text{ m}^2$):

$$A_N = \frac{0,427}{0,1} = 4,27 \text{ m}^2$$

El área utilizada en el túnel de viento virtual para todas las simulaciones de las motocicletas en Xflow™ es de $4 \times 6 = 24 \text{ m}^2$, un valor que supera con holgura el valor mínimo permitido calculado de $4,27 \text{ m}^2$. Por tanto, los valores aplicados cumplen el primer ratio de bloqueo.

➤ Longitud relativa

El segundo parámetro que caracteriza las dimensiones del túnel de viento es la longitud relativa o “*relative length*”. Esta longitud (λ) toma el valor de 3 para vehículos y viene dado por la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{L}{D_N}$$

Siendo:

L: distancia entre la entrada y la salida del túnel

D_N: diámetro equivalente hidráulico del túnel

$$D_N = \frac{4 \times A_N}{C}$$

C: perímetro mojado del túnel

En primer lugar, se obtiene el valor del diámetro hidráulico por medio de su ecuación:

$$D_N = \frac{4 \times 24}{4 + 6 + 4 + 6} = 4,8 \text{ m}$$

A continuación, conociendo el valor de la longitud relativa del túnel (3) y el diámetro hidráulico calculado (0,854 m), se obtiene la longitud mínima del túnel que se puede utilizar en la simulación:

$$L = \lambda \times D_N = 3 \times 4,8 = 14,4 \text{ m}$$

El valor de 14,4 es un valor mínimo para la longitud del túnel de viento. Por lo tanto, para cumplir el parámetro de longitud relativa y optimizar el tiempo de cálculo se toma la longitud de 15 m para el túnel de viento virtual.

Por tanto el túnel de viento en las simulaciones posteriores, cumpliendo con los parámetros establecidos en la normativa de túneles de viento [2,pag.634] tendrá las siguientes dimensiones:

Anchura = 6 metros

Altura = 4 metros

Longitud = 15 metros

– Materials

Este menú caracteriza los fluidos que se van a utilizar en el cálculo. Para el presente proyecto se utiliza el aire en condiciones normales con los valores que se pueden observar en la **Figura 12**.



Figura 12: ventana Materials

– Geometry

Este apartado identifica de forma individual los elementos que se han importado. Cada uno de ellos puede ser posicionado y orientado como se puede observar en la **Figura 13**.

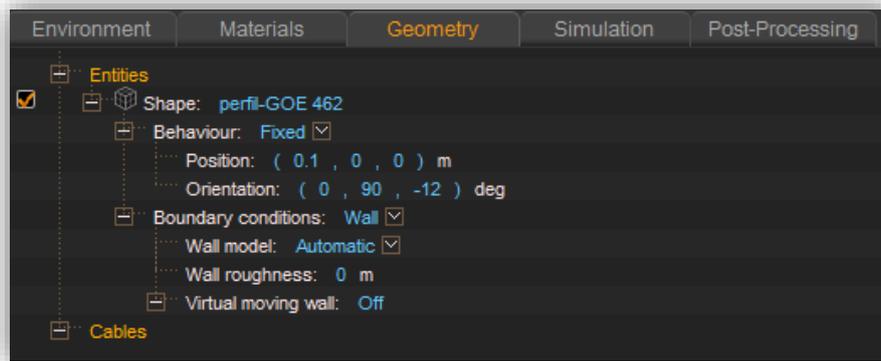


Figura 13: *ventana Geometry*

Además puede aplicarse mediante el botón **Behaviour**, un comportamiento **Rigid body dynamics**, que calcula las inercias del elemento y permite añadir fuerzas y momentos externos por el usuario.

– Simulation

Este menú es el indicado para realizar el mallado del elemento a estudiar y también de su entorno. Como se puede observar en la **Figura 14**, permite realizar varias transiciones de mallado por medio de la opción **Refinement transition length**.

Xflow™ es un programa de cálculo transitorio, por lo que es necesario que transcurra cierto tiempo hasta alcanzar un estacionario. Para los estudios analizados en este trabajo, se ha apreciado que con 1 segundo de simulación, los parámetros alcanzaban dicho estado.



Figura 14: ventana de la opción simulation

En lo que respecta al grosor de mallado, este apartado del menú permite modificar el mallado tanto de la moto y sus zonas cercanas, como del túnel de viento en general.

Mediante la opción **Resolved scale**, se modifica el tamaño de elemento para el mallado general del túnel.

Mientras, mediante la ventana **Refinement algorithm**, se toma la opción **Adaptative Refinement**, que permite mallar por separado las zonas cercanas a cada elemento importado al programa, y realiza un mallado del aire conforme se va modificando su trayectoria. La opción **Target resolved scale**, es la que modifica el tamaño de elemento de cada elemento importado.

Además, activando la opción **Adaptative Refinement**, se abre la ventana para modificar el tamaño de elemento en una distancia más alejada del elemento importado.

En este apartado, existe también un parámetro relacionado indirectamente con las simulaciones. Este parámetro se llama **Courant** y es el principal control sobre el programa de cálculo, relacionándose también con el parámetro de estabilidad. En general, las simulaciones estabilizan su parámetro de estabilidad (**Stability parameter**) en los primeros instantes de simulación (valores del parámetro de estabilidad por debajo de 1 significa que el parámetro está estabilizado). Sin embargo, hay ocasiones en que el valor del parámetro de estabilidad es mayor que 1 y es necesario disminuir el **Courant**-cuyo valor de referencia es 1- para poder realizar la simulación.

– Post-Processing

En este apartado del **Project Tree**, se añaden menús de visualización de los resultados activando las distintas opciones existentes. Está relacionado con la ventana **Graphic View**, en la que se observa gráficamente el resultado de las opciones activadas en el menú anterior. La tarjeta gráfica utilizada influirá en los posibles resultados gráficos que se puedan visualizar ya que es necesaria gran capacidad de hardware para obtener buenos resultados de visualización.

Estos parámetros se pueden observar en la **Figura 15**

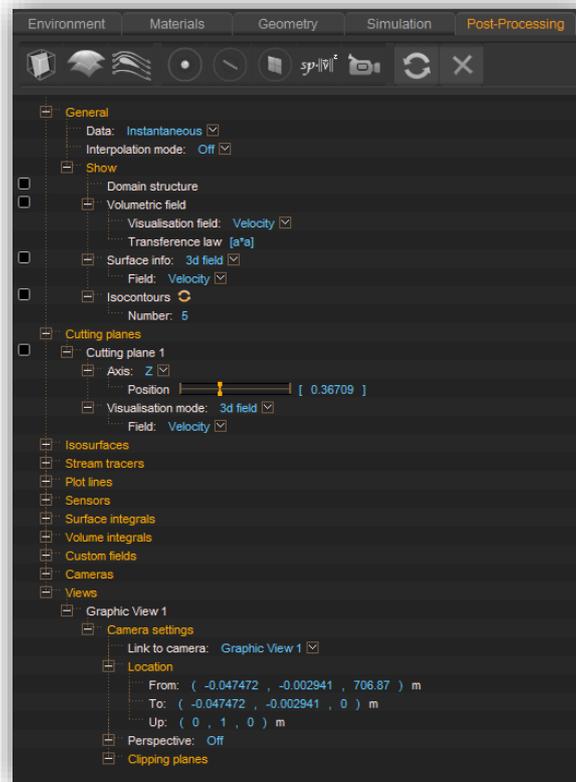


Figura 15: ventana Post-Processing

Existen también otras ventanas importantes en el programa, una de ellas ya ha sido comentada como es la ventana **Graphic View**, pero existen otras dos ventanas más con importancia relevante:

– Message View

Esta ventana (**Figura 16**), ofrece información en tiempo real de los cálculos que se están realizando en el programa y de los parámetros importantes, como pueden ser el área de referencia y el número de elementos.

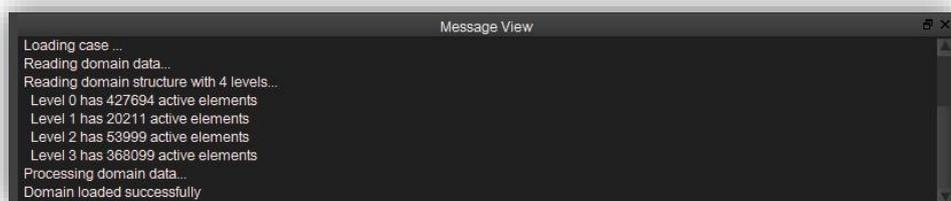


Figura 16: visualización de la ventana message view

– Function Viewer

En esta ventana (**Figura 17**), se observan las gráficas de los parámetros calculados en la simulación, la variación del valor del parámetro de cada variable aparece graficada respecto al tiempo en esta ventana.

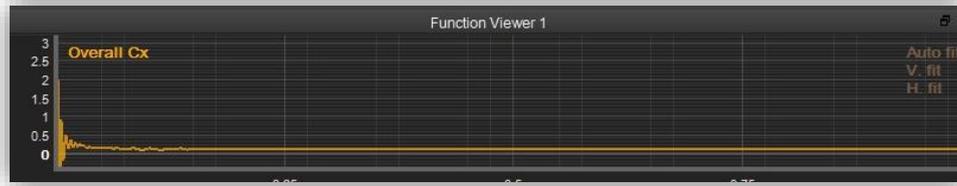


Figura 17: visualización de la ventana function viewer

3.2 Desarrollo del trabajo (diagrama de flujo)

En este apartado se presenta el diagrama de flujo del trabajo a realizar. Este diagrama explica la forma de trabajar utilizada por el proyectista a lo largo del proyecto, y las soluciones a adoptar en cada una de las soluciones producidas en el proceso.

El trabajo comienza con la elección del proyecto. El proyecto seleccionado necesita de varios procesos para llegar al resultado final por lo que se utiliza un mapa de procesos para definir gráficamente el trabajo a realizar.

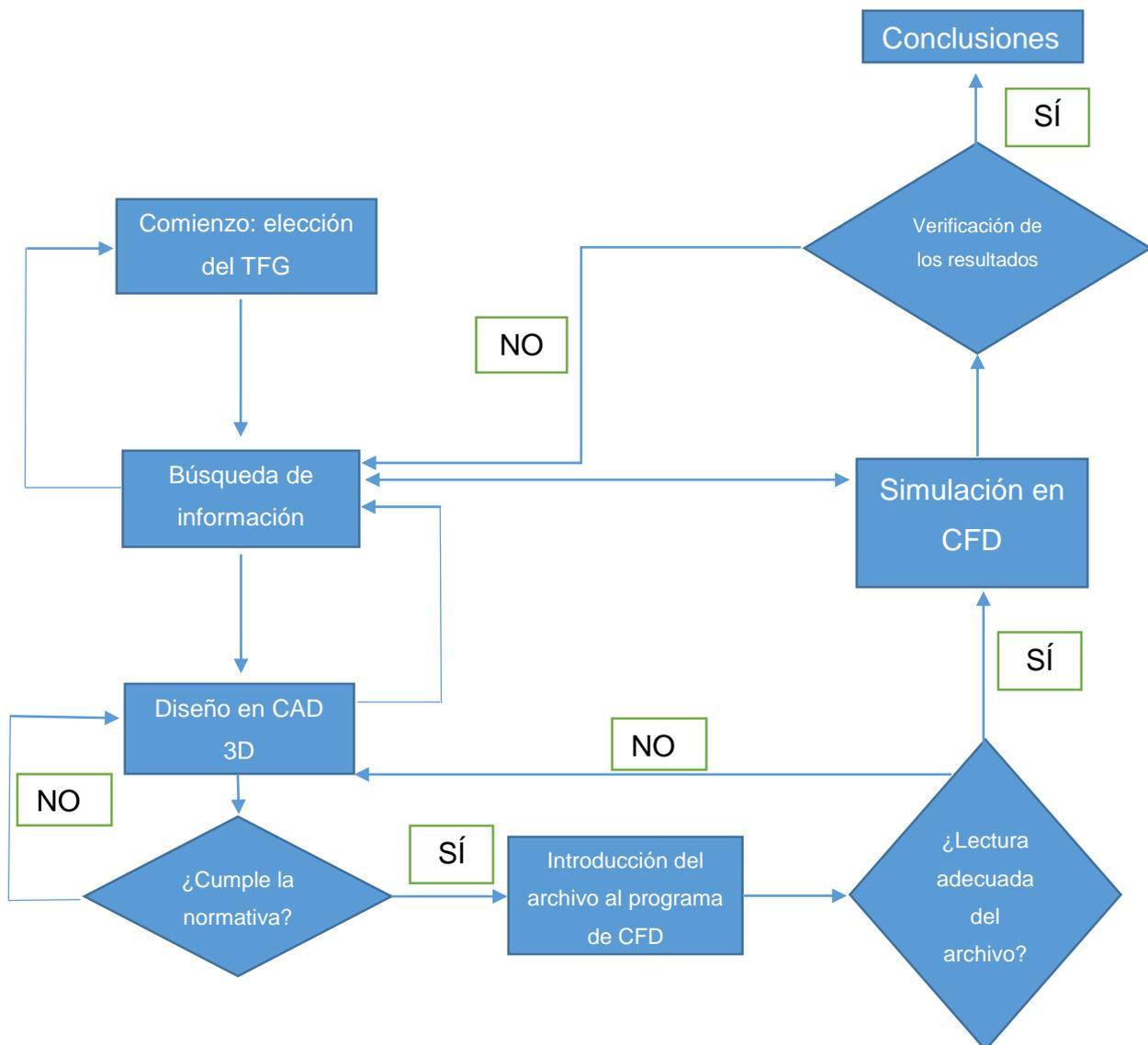
Tras la elección del proyecto, la primera función a realizar es la búsqueda de información acerca del mismo. En primer lugar, se obtiene información de los informes y archivos de Motostudent™ presentes en la universidad. Después, se realizan búsquedas de información en bases de datos científicas [5] en las que se obtienen artículos e informes relacionados con el proyecto a realizar.

El siguiente proceso, es el referente al diseño en CAD 3D de los elementos que más tarde formarán parte de la simulación. Este diseño, debe cumplir la normativa regulatoria del reglamento de Motostudent™ para poder llevar a cabo la fabricación del mismo en caso de que las simulaciones obtuvieran los resultados esperados. En el caso de que el diseño cumpla el reglamento, se pasa al siguiente proceso, mientras que en caso contrario se debe volver a realizar un nuevo diseño de forma que sí cumpla estas necesidades de la normativa.

Tras la realización del dibujo, el siguiente proceso es la introducción del mismo al programa de CFD, que como se explica más adelante pueden existir problemas de lectura del dibujo por parte del software utilizado. En caso de que la lectura del dibujo sea adecuada, se continúa con el siguiente proceso, en cambio, sí la lectura es inadecuada o tiene ciertos problemas se debe volver a recurrir a modificar el dibujo en CAD 3D.

El último proceso, es el propio de la simulación de los elementos importados en el programa de CFD. En este proceso se debe verificar la convergencia de los resultados por medio de la interacción de la información obtenida en el primer proceso y los resultados obtenidos en este último.

Tras este último proceso se llega a unas conclusiones a cerca del trabajo realizado que justificarán o no el objetivo propuesto con el proyecto, pero que deben tener un soporte claro en el caso de su no justificación del objetivo.



MODELO BASE: HONDA™ RS

4 MODELO BASE: HONDA™ RS

El proyecto, como ya se ha comentado, parte de la base del análisis aerodinámico del carenado de una Honda™ RS.

En este apartado, se explica cómo se ha obtenido la información del carenado, los cambios realizados en dicha información por el proyectista y los problemas surgidos al trabajar con estos archivos en los distintos programas.

4.1 Adquisición de la información del carenado

Este carenado se ha obtenido gracias a la información obtenida del equipo Motostudent™, cuyo componente del equipo en el año 2010, Unai Zabala Versteeg, realizó una gran labor de ingeniería inversa por la que consiguió obtener las superficies del carenado que habían adquirido, para programas de CAD.

La ingeniería inversa para este tipo de trabajos se realiza de tres maneras:

- Escáner en 3D

Este tipo de ingeniería inversa, consigue obtener el dibujo en CAD del objeto por medio del escaneo del mismo. Realiza una nube de puntos que tras ser unida mediante programas de CAM, consigue una buena aproximación del objeto real.

En el campus de Tudela de la Universidad Pública de Navarra, existe un escáner para objetos de tamaño reducido por lo que para este caso no pudo ser utilizado este tipo de tecnología.

- Máquina de medición por coordenadas

Esta tecnología, consigue obtener una nube de puntos como en el caso anterior pero en este caso lo hace por medio de un palpador manual con el que

se obtienen multitud de puntos característicos de las curvas para después ser unidos por un programa de CAD.

– Fotogrametría

Esta técnica permite realizar un modelo tridimensional a partir de una serie de fotografías, en la cuales se deben marcar algunos puntos denominados puntos de apoyo. Una vez procesadas las fotografías se encuentra la posición en el espacio de estos puntos y se trabaja la geometría a partir de estos.

El dibujo en CAD obtenido por Unai Zabala, se realizó por medio de fotogrametría, que por medio de la nube de puntos obtenida consiguió un carenado con unas geometrías muy cercanas a la realidad.

El dibujo final obtenido por el proyectista es el que se puede observar en la **Figura 18**, que es el punto de partida del actual proyecto.

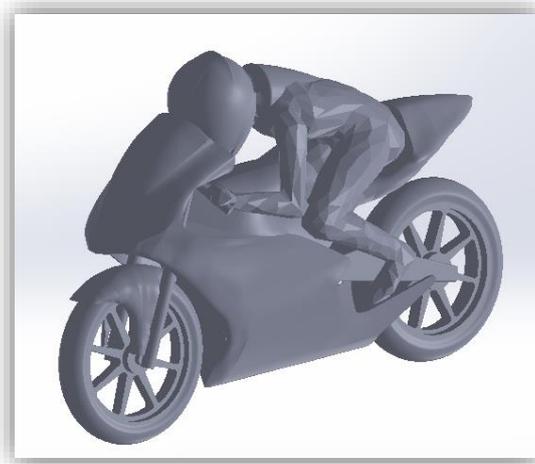


Figura 18: dibujo en Solidworks™ del archivo obtenido

Como se puede observar en la figura, el dibujo obtenido refleja tanto la moto como el piloto, formando una única superficie, lo que facilita el estudio aerodinámico en estático. En cambio, las ruedas no van a poder ser simuladas en su movimiento de giro real si este archivo es el utilizado, por lo que la aproximación a la realidad no va a ser buena.

4.2 Introducción del archivo en Xflow™

El archivo obtenido es del tipo .SLDRTP (archivo de Solidworks™), y el programa Xflow™ 2015 sólo importa archivos del tipo .STEP o similares (.STP etc).

Debido a ello, el archivo es guardado en .STEP por medio del programa Solidworks™ y es importado a Xflow™ como una única pieza, tanto carenado, como ruedas y piloto. Se realiza de esta manera para poder obtener una aproximación inicial a los parámetros aerodinámicos.

Se produjeron problemas al importar el objeto a Xflow™ debido a su orientación. El programa Xflow™ parte de la posición en la que se importa el objeto y le introduce unos ejes de coordenadas con los que se calcula el área frontal de referencia. Es decir, el área mediante la que el programa calcula la simulación es el área frontal inicial del objeto importado, únicamente pudiéndose modificar la orientación del objeto no su posición.

Ya en el programa Xflow™, el número de Reynolds utilizado es el mismo que se encuentra en el proyecto de Unai Zabala para poder comparar los resultados iniciales del actual trabajo. Se utilizan los siguientes valores para obtener dicho número adimensional:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 38,8 \cdot 1,232}{1,2894 \cdot 10^{-5}} = 4541412 = 4,5 \cdot 10^6$$

Siendo:

$$\rho(\text{densidad del aire}) = 1,225 \frac{kg}{m^3}$$

$$v(\text{velocidad del fluido respecto a la moto}) = 38,8 \text{ m/s}$$

$$L(\text{longitud de referencia}) = 1,232 \text{ m}$$

$$\mu(\text{viscosidad dinámica del aire}) = 1,2894 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Tanto la velocidad, como la densidad y viscosidad dinámica del aire son valores claros en este cálculo. Sin embargo, para obtener el valor de la longitud de referencia es necesaria la búsqueda bibliográfica que haga referencia a este tipo de parámetros. En el libro del autor Simon McBeath [6,pag.47] el apartado referido al número de Reynolds dice que para alas la longitud de referencia es la cuerda y para automóviles la longitud de referencia es la distancia entre ejes.

En el caso de la moto utilizada, la distancia entre ejes calculada por medio del programa Solidworks™, es de 1,232 m, la longitud utilizada en la Ecuación anterior.

Finalmente, el área frontal obtenida al importar la moto directamente del archivo de Solidworks™ es de 1,21834 m² (**Figura 19**). El programa Xflow™, pese a que se oriente la moto en la posición requerida (orientación X negativa), sigue tomando el área frontal inicial del objeto importado.



Figura 19: orientación y área de referencia obtenida al importar la moto a Xflow™

Por ello, se pueden tomar tres decisiones para realizar los cálculos:

- Orientación del objeto en Solidworks™

Para ello, se utiliza la herramienta “girar ensamblaje” del programa de dibujo. Conociendo la orientación requerida en Xflow™, se realiza el cambio de orientación en el software y el área frontal obtenida realizando este proceso sí que es la adecuada.

Se comprueba el resultado y se verifica.

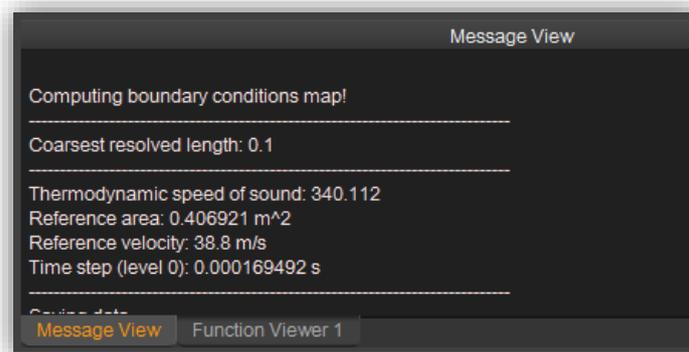


Figura 20: *área de referencia tras orientar la moto en Solidworks™*

El nuevo área obtenida es de 0,406921 m² (**Figura 20**), que se ha comparado con la medida del área frontal de la moto en Solidworks™. Al ser valores muy similares en ambos casos, se da por bueno el valor obtenido en el programa Xflow™.

- Cambio del valor del área de forma manual

Este ha sido el procedimiento utilizado. De esta manera, se orienta la moto de la forma adecuada para la realización de los cálculos, y de forma manual se

cambia el valor del área frontal por medio del botón “Custom” integrado en el apartado “Environment” del programa Xflow™.

- Reorientación de ejes locales

Por último, existe este procedimiento que es el más adecuado para solventar el problema y que se ha conseguido llegar a él por medio de muchas horas de prueba con el programa y adquiriendo cierta experiencia.

Este procedimiento permite orientar los ejes de coordenadas locales de cada objeto importado en su centro de gravedad y con los ejes orientados en la misma disposición que los ejes globales.

Este último método es el utilizado para este archivo inicial, ya que además de obtener el área frontal de forma analítica sin necesidad de extrapolar, permite también alcanzar la posición precisa de los ejes locales respecto a los globales.

4.3 Simulación y resultados: Gráfica de convergencia c_x - nº elementos

Este apartado explica y justifica los cálculos realizados en el modelo base importado directamente al programa de CFD. El archivo importado es un único objeto, por lo que tanto la moto como piloto y ruedas van unidos. Esto permite una mayor facilidad en el cálculo, pero impide dar validez a los resultados ya que por ejemplo las ruedas no giran dentro del túnel de viento virtual, por lo que los resultados obtenidos se tomarán como una aproximación a los reales.

El programa Xflow™, como ya se ha comentado permite modificar el tamaño de elemento de mallado, pero el propio programa realiza la malla. Debido a esto, se realiza un cálculo de la convergencia de uno de los parámetros a calcular para, de esta forma, obtener el valor de mallado que optimiza el cálculo en la simulación.

El parámetro tomado para el cálculo de convergencia es el coeficiente de arrastre, ya que es el parámetro más importante en el estudio aerodinámico de una motocicleta.

Para obtener los distintos tamaños de mallado, se utilizan las variables presentes en el programa que permiten cambiar el tamaño de elemento como son las variables **Resolved Scale (RS)** y **Target Resolved Scale (TRS)**.

Estas variables realizan regiones de mallado según el valor que se le imponga a las mismas. Es decir, la variable **RS**, realiza un mallado general con el valor de tamaño de elemento que se le imponga en las paredes del túnel de viento, mientras que la variable **TRS**, realiza el mallado local en el objeto importado y en las posteriores trayectorias del aire, ya que produce el remallado según la turbulencia producida en la estela.

En la **Tabla 2** se muestran las simulaciones que se han realizado para llevar a cabo el estudio de convergencia, realizado mediante la comparación del valor obtenido para el coeficiente de arrastre Cx.

Estudio de convergencia. Moto original									
Ensayos	Resolved scale (m)	Target resolved scale (m)	Wake resolution (m)	Nº elementos	Cx	%Error	Cy	% Error	t cálculo
Ensayo 1	0.3	0.15	0.15	1.91E+04	1.204	204.0	0.264	1550.0	5 min
Ensayo 2	0.1	0.05	0.05	3.84E+05	0.571	44.2	0.085	431.3	1 h
Ensayo 3	0.1	0.025	0.025	4.64E+05	0.488	23.2	0.071	343.8	2 h
Ensayo 4	0.1	0.0125	0.0125	8.93E+05	0.396	0.0	0.016	0.0	7.5 h
Ensayo 5	0.05	0.025	0.025	2.96E+06	0.446	12.6	0.053	231.3	12 h
Ensayo 6	0.05	0.0125	0.0125	3.27E+06	0.425	7.3	0.004	-75.0	24 h
Ensayo 7	0.05	0.00625	0.00625	4.62E+06	0.415	4.8	0.009	-43.8	72 h

Tabla 2: variables de mallado y resultados obtenidos

En la **Figura 21**, se puede observar un ejemplo del mallado que realiza el programa con los valores de **RS** 0,1 m y de **TRS** 0,0125 m. Se puede observar que existen dos regiones de transición entre el mallado más grueso del exterior y el más fino que está adherido a la moto.

Este mallado, se puede observar que va a tener una buena interacción entre el flujo del aire y la moto puesto que está bien estructurado y además mediante el **Wake Resolution (WR)**, las propias turbulencias se remallan en la parte posterior conforme avanza el tiempo de simulación.

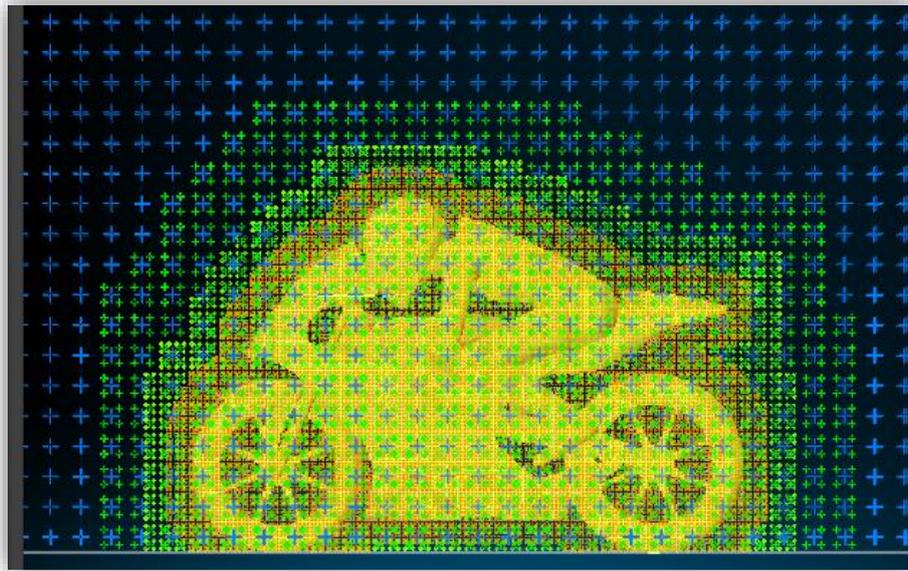


Figura 21: mallado utilizado para la simulación RS 0,1 m y TRS 0,0125m

Por último, la **Figura 22** muestra la gráfica de convergencia de los valores de coeficiente de arrastre obtenidos:

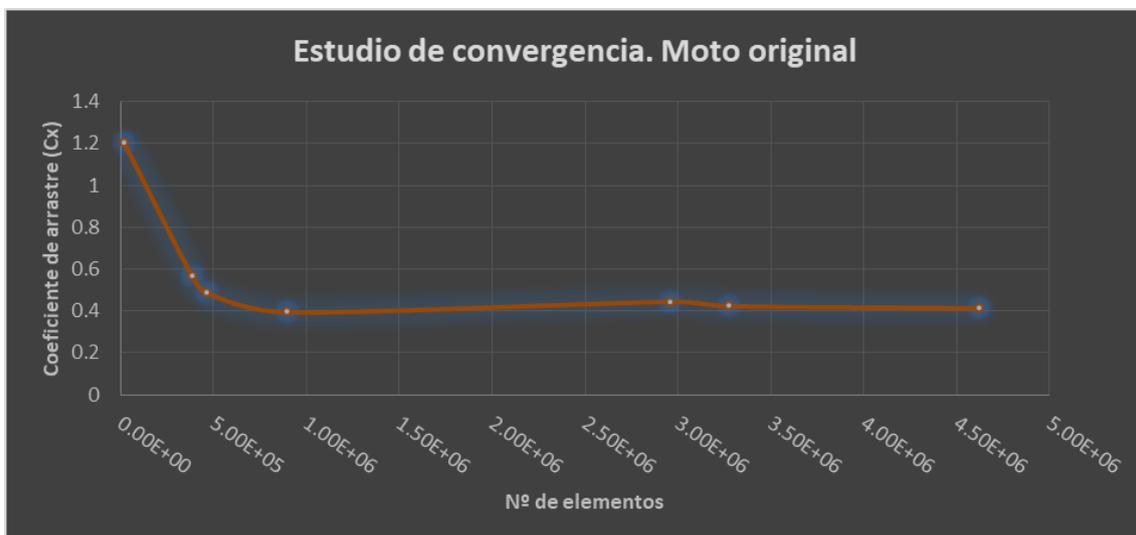


Figura 22: gráfica de convergencia con el archivo inicial de Honda™ RS

La gráfica obtenida (**Figura 22**) representa el número de elementos frente al coeficiente de arrastre. El número de elementos viene definido por el tamaño impuesto en las variables del programa. Se observa que conforme aumenta el número de elementos, el coeficiente de arrastre converge en un valor cercano a 0,42 en esta simulación. Por lo tanto, se podría concluir que para futuras

simulaciones, el coeficiente resultante no va a variar pese a aumentar el número de elementos por lo que no será necesario realizar simulaciones con tamaño de elemento muy pequeño para este tipo de trabajo.

Sin embargo, pese a que en esta simulación el coeficiente de arrastre de los valores de RS 0,1 m y TRS 0,0125 m, sí que varía un 7,3% respecto al valor de convergencia (Ensayo 6), se toman dichos parámetros ya que en posteriores simulaciones cuyos resultados son más reales sí que converge sin error apreciable.

Los valores obtenidos en la simulación para los parámetros aerodinámicos son los siguientes:

	Cx	Cy
Promedio	0.396	0.016
Desviación típica	0.008	0.011

Tabla 3: valores promedio y desviación típica de los coeficientes aerodinámicos para el modelo base

Mediante este resultado y conociendo el área frontal (0,406 m²), se calcula el coeficiente de arrastre por unidad de área:

$$C_{XA} = 0,396 * 0,406 = \mathbf{0,161}$$

Tomando como referencia la tabla de coeficientes del apartado de aerodinámica en motocicletas [3], cuyo valor para la moto simulada es de **0,20**, se puede dar validez al resultado como una primera aproximación, ya que como se ha visto, esta simulación no es totalmente asimilable a la realidad.

Además, se observa que el coeficiente de sustentación tiene un valor de la desviación típica muy similar al promedio, ambos muy pequeños y el promedio de valor positivo. Esto quiere decir que la moto tiene una sustentación positiva pero cuyo parámetro no es de gran fiabilidad puesto que el valor absoluto de la desviación típica es muy similar al promedio.

NUEVO MODELO
DESARROLLADO

5 NUEVO MODELO DESARROLLADO

El archivo de partida, como ya se ha comentado, tiene el inconveniente de que todas las partes vienen como un único sólido al importarlo a Xflow™, por lo que los resultados de las simulaciones no pueden darse como ajustados a la realidad.

Para conseguir una simulación adecuada, se deben realizar modificaciones en el archivo de partida. La separación de la moto y las ruedas se realiza de forma sencilla, pero la separación del piloto de la propia moto es una labor de cierta dificultad cuyo trabajo se expone en el primer punto de este apartado.

En el segundo apartado, se explican los problemas surgidos en la importación de la moto modificada, en el programa de CFD. Además se explican también las soluciones aplicadas siguiendo el diagrama de flujo explicado en el apartado anterior.

Por último, se desarrolla la simulación y se validan los resultados tanto para el nuevo modelo fijo como con las ruedas girando, siendo esta última simulación la que debiera tener mayor veracidad puesto que es la que mejor se aproxima a la realidad hasta de las que se han realizado en este proyecto.

5.1 **Modificación del modelo en CAD**

El modelo de partida, como ya se ha comentado, es modificado para que las ruedas puedan girar de manera independiente y para que la moto y el piloto puedan inclinarse y actuar en la simulación como si se encontraran en una curva. Para ello, hay que eliminar el piloto de la motocicleta y de esta forma obtener la motocicleta por un lado y después colocar el piloto de la forma adecuada.

El archivo fue dibujado en el programa CATIA™, programa en el cual el proyectista no tenía formación por lo que el trabajo realizado dispuso de mayor tiempo del esperado para esta labor, ya que era necesario conocer ciertos menús y aplicaciones propias del programa para realizar las distintas modificaciones.

5.1.1 Motocicleta Honda™ RS

El archivo de partida conforma una superficie de espesor nulo que dibuja el contorno del volumen tanto de la moto como del piloto. Esta superficie está formada por polígonos de tres o cuatro lados (tessellation) que pueden ser borrados de manera individual en el programa CATIA™.

Tras borrar las superficies pertenecientes al piloto, aparecen espacios que no se encuentran completamente cerrados en la superficie de la moto (**Figura 23**). Para ello, se utiliza primero la función **fill** (llenar) con la que se consigue cerrar el espacio en el asiento del piloto.

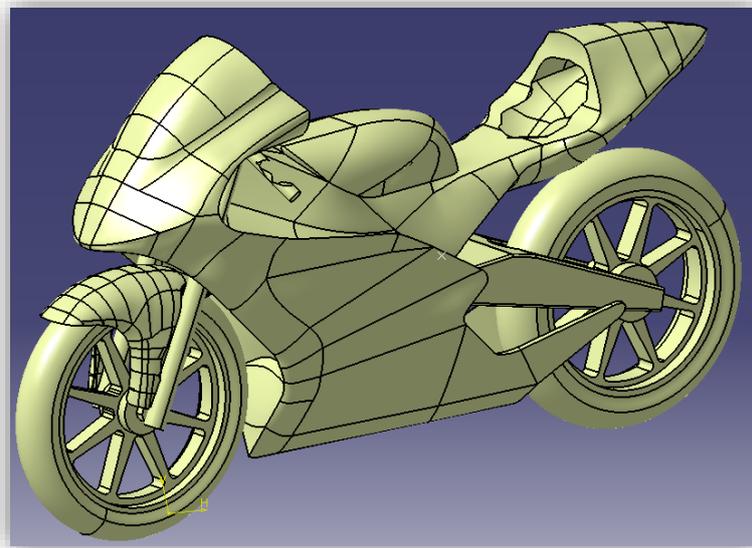


Figura 23: superficies abiertas generadas al eliminar el piloto

Después, se utiliza la función **extrude** (extruir) para cerrar el espacio libre producido al eliminar las manos del piloto en el manillar de la motocicleta.

La situación final de la moto tras la utilización de estas funciones de CATIA™ para cerrar los huecos producidos, se puede observar en la **Figura 24**.

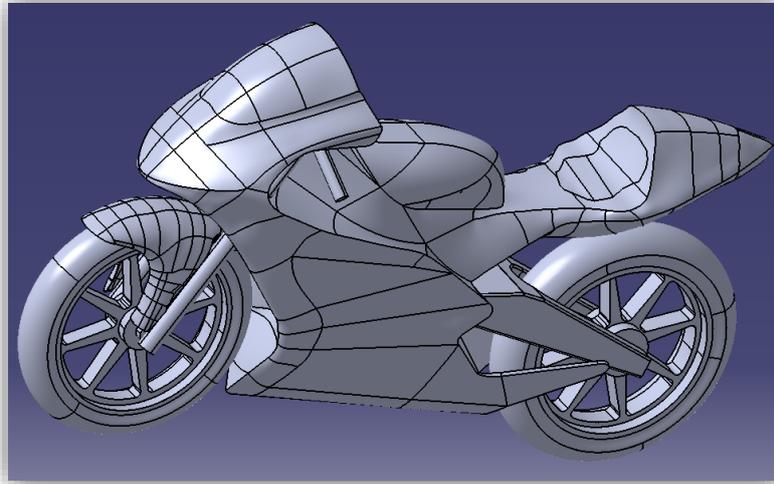


Figura 24: moto con huecos anteriormente generados, cerrados

5.1.2 Piloto

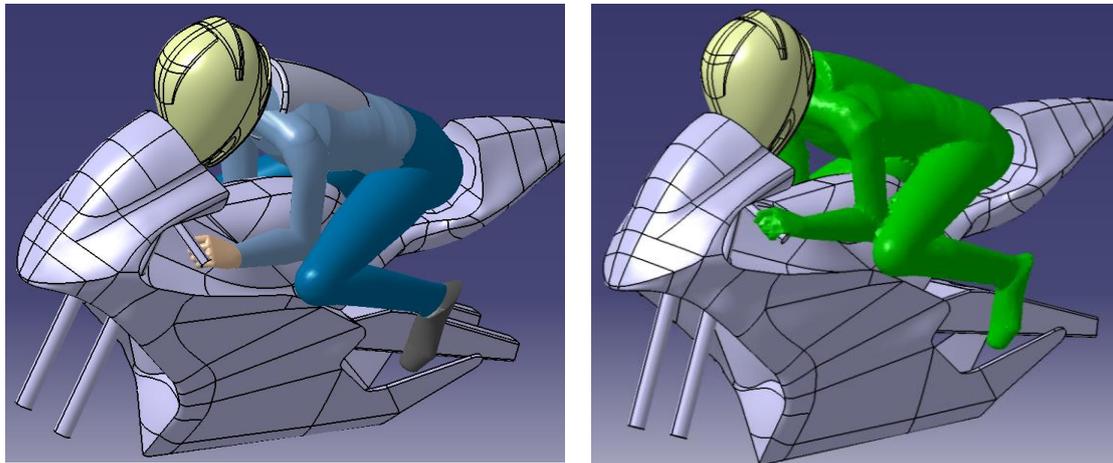
El piloto se realiza por medio de la herramienta **Human Bilder** del propio programa CATIA™, que permite obtener un maniquí con la altura impuesta y al que se le pueden modificar hasta cierto límite las posiciones de las distintas extremidades.

El piloto tras ser colocado en la posición requerida, debe guardarse como superficie, ya que únicamente puede ser leído como maniquí en el programa CATIA™. Para ello, se utiliza la función **Wrapping** del programa de dibujo, que permite realizar un mallado mediante triángulos o cuadrados del objeto del que se quiere obtener una superficie.

Se realizan varios modelos de mallado del piloto modificando la semilla, y se obtiene finalmente el modelo que mejor se adecúa a las características que son necesarias para el estudio aerodinámico. Esto es, una superficie muy similar a la realidad y sin cambios bruscos de trayectoria en la superficie (evitando puntas etc). Este mallado pertenece a la semilla de mallado de valor 10.

Las modificaciones de la posición del piloto se realizan por medio de la función **Posture editor** que permite mover individualmente las extremidades y la posición del piloto de forma individual. De esta forma, se adapta el piloto a la posición que se quiera adquirir en la moto.

En el caso de este proyecto, se toma una única posición para el piloto, que es la posición de mínima resistencia. Sin embargo, se realizan también otras disposiciones distintas ya que son necesarias para la posible mejora de los estudios aerodinámicos. La primera disposición y como ya se ha comentado la posteriormente utilizada en este proyecto es la posición del piloto en mínima resistencia aerodinámica (**Figura 25**).

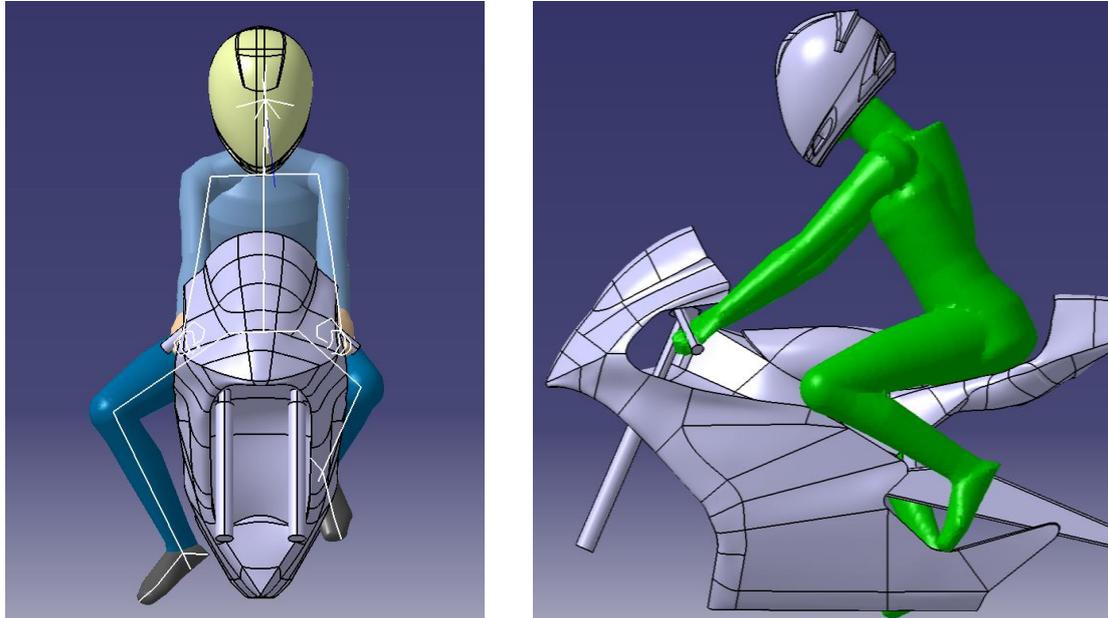


a) Piloto en mínima resistencia

b) Piloto mallado, mínima resistencia

Figura 25: *vista oblicua de carenado y piloto en mínima resistencia*

La segunda es el piloto en posición de máxima resistencia aerodinámica, es decir, en posición de frenada en recta (**Figura 26**).



a) Vista frontal del piloto

b) Vista lateral del piloto una vez realizado el mallado del mismo

Figura 26: *piloto en posición de máxima resistencia*

La tercera de ellas, es la posición del piloto y moto tomando una curva (**Figura 27**).

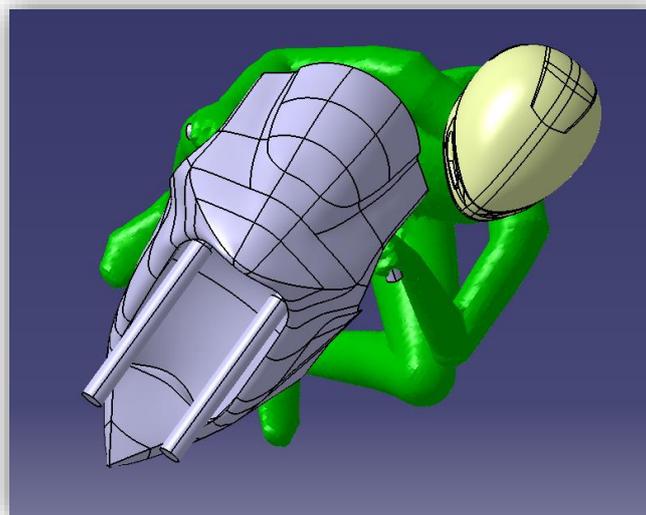


Figura 27: *posición del piloto en curva*

Estas dos últimas disposiciones del piloto, son utilizadas por el compañero de ingeniería mecánica Sergio Alfaro Ezcurra, que centra su estudio en un tipo de mejoras aerodinámicas distintas a las realizadas en este trabajo.

Además, este tipo de disposiciones pueden ser utilizadas en futuros trabajos para continuar los estudios aerodinámicos implementados en éste, pero simulando también las distintas situaciones de la moto y piloto.

5.2 Introducción del archivo a Xflow™

Tras la realización de las modificaciones en el archivo en CATIA™, se pasa a introducir el mismo a Xflow™. El programa de CFD tiene una lectura de archivos muy específica, es decir, que únicamente consigue importar de forma óptima una serie de archivos de una clase específica.

Esto último, produce que surjan una serie de problemas en la introducción de los archivos a Xflow™, especialmente en el caso del archivo de la motocicleta modificada. Tras observar los resultados de la importación de la moto se toman una serie de medidas para solucionar los problemas que son explicadas en este apartado.

5.2.1 Problemas surgidos y soluciones adoptadas

El archivo de la motocicleta en CATIA™ no permite ser guardado en ninguno de los tipos de archivo que permite como lectura el programa Xflow™, por lo que como primera medida se guarda el archivo como .IGES que es un archivo de lectura universal de dibujos en CAD para importarlo al programa Solidworks™.

Tras importar este archivo, el mismo es guardado como .STEP y .STP, archivos que Xflow™ sí permite para su lectura. En el archivo .STP al realizar la lectura el programa de CFD, aparece el carenado con muchos huecos en su superficie como se puede observar en la **Figura 28**. Por lo tanto, no podría

realizarse la simulación aerodinámica mientras estas superficies huecas no sean cerradas de alguna manera.

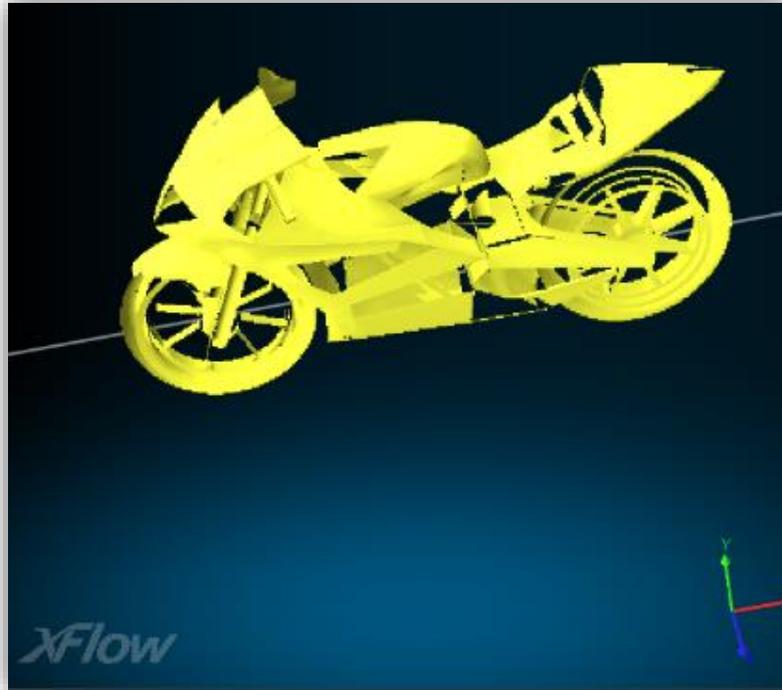


Figura 28: *vista gráfica de la moto con huecos al ser importada tras la modificación*

Estos huecos surgidos, se observa que pueden ser superficies que el programa lee con orientación distinta, por lo que se toma la decisión de orientar todas las superficies del carenado en el mismo sentido por medio del programa CATIA™.

Tras esto, se guarda el archivo en el formato .STEP y se vuelve a importar al programa de CFD volviendo a producirse pequeños huecos identificables ahora por medio de la herramienta **Show**.

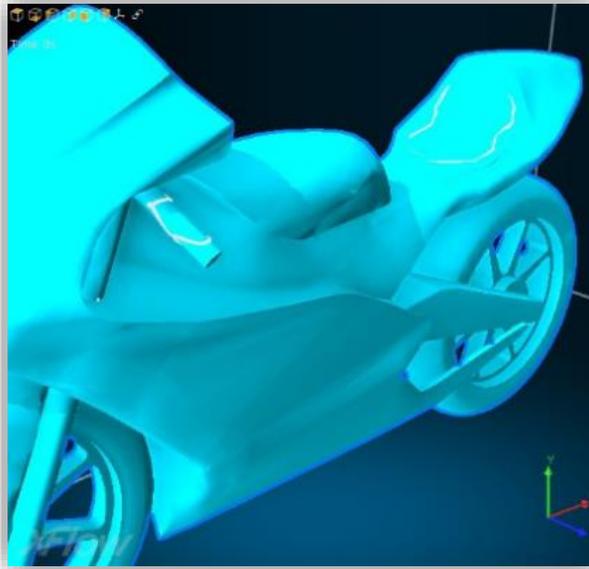


Figura 29: huecos apreciables con la herramienta Show

Tras esto, se toma la decisión de utilizar la opción coser del programa Solidworks™ que permite unir las superficies que debido a las distintas tolerancias que puedan existir al guardar los archivos en distintos tipos de fichero puedan estar separadas.

Con estas modificaciones, el archivo finalmente no tiene huecos detectables por el programa de CFD por lo que está listo para realizar las simulaciones con aire en el túnel de viento virtual.

Otro de los problemas surgidos en esta introducción del archivo a Xflow™ es, como ya ha ocurrido en el apartado anterior, el cálculo del área frontal del objeto importado. Esta área frontal se impone en el programa por el método de la modificación del área en el programa de CFD mediante la herramienta **Custom**. Se realiza de esta manera debido a que al importar los elementos de forma independiente, el programa toma el área frontal inicial como valor para el cálculo de la simulación.

El área impuesta se obtiene por medio de CATIA™, que a pesar de tener una opción de cálculo del área proyectada, no permite realizarlo para los elementos del actual proyecto. Por lo tanto, se toma la decisión de calcularse realizando un plano y dibujando el perímetro frontal de la motocicleta, piloto y demás objetos a estudiar y obteniendo el área interior de éste perímetro, cuyo valor aproximado es de **0,427 m²** (ver **Figura 30**)

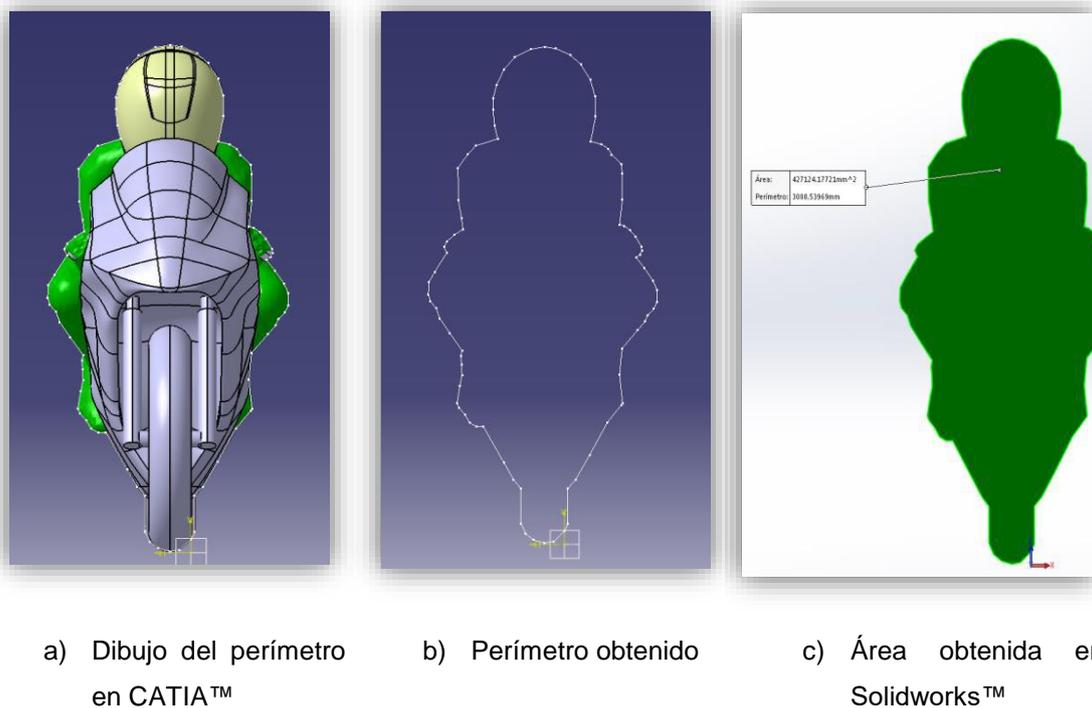


Figura 30: método utilizado para medir el área del conjunto

No es posible realizar todo en el programa Solidworks™ debido a que el archivo del piloto no tiene lectura posible en dicho programa. Debido a ello, se toma la decisión de realizar el perímetro en CATIA™ y el cálculo del área del interior de dicho perímetro en el programa Solidworks™.

De esta forma se consigue una gran aproximación al área frontal real del conjunto que puede ser utilizado en el conjunto de las simulaciones que se realizarán posteriormente.

Otro problema surgido, es el referente a la longitud de referencia. Esta longitud es tomada por defecto como 1m por el programa pero en simulaciones

de motocicletas, como se ha comentado anteriormente, la **longitud de referencia** utilizada es la distancia entre ejes de las ruedas. En este caso dicha distancia es **1,232 m**, que es impuesta en las distintas simulaciones por medio de la opción **Custom**. Esta ventana aparece al introducir en la herramienta **Turbulence generation** la opción **Automatic**.

5.3 Simulación y resultados

Este apartado contiene la agrupación de los distintos cálculos que se realizan en las distintas simulaciones con el nuevo modelo. En primer lugar se explican y justifican los resultados obtenidos para el nuevo modelo en situación fija, es decir sin que las ruedas giren respecto al suelo. Después se realiza el mismo cometido para el nuevo modelo dinámico, es decir con las ruedas girando respecto al suelo, siendo esta simulación la que mejor se aproxima a la realidad.

5.3.1 Convergencia con nuevo modelo fijo

Se realizan distintas simulaciones del nuevo modelo desarrollado, mediante las cuales se obtiene un mallado óptimo para las realizar las posteriores simulaciones con las implementaciones desarrolladas. Es decir, se realizan simulaciones con distintos valores de tamaño de elemento con los que finalmente se realiza una gráfica de convergencia del parámetro C_x . Esta gráfica, se estabiliza conforme el tamaño de elemento es menor, y tras ello se toma el valor más adecuado de mallado para realizar las futuras simulaciones.

Los valores obtenidos para los parámetros aerodinámicos y sus errores relativos son los que se observan en la **Tabla 4**:

Estudio de convergencia. Moto modificada en CAD									
Ensayos	Resolved scale (m)	Target resolved scale (m)	Wake resolution (m)	Nº elementos	C_x	% Error	C_y	% Error	t cálculo
Ensayo 1	0.3	0.15	0.15	1.97E+04	1.071	135.4	-0.108	-871.4	5 min
Ensayo 2	0.1	0.05	0.05	3.84E+05	0.602	32.3	0.075	435.7	1 h
Ensayo 3	0.1	0.025	0.025	4.64E+05	0.501	10.1	0.049	250.0	2 h
Ensayo 4	0.1	0.0125	0.0125	9.59E+05	0.455	0.0	0.014	0.0	13 h
Ensayo 5	0.05	0.025	0.025	2.96E+06	0.489	7.5	0.05	257.1	14 h
Ensayo 6	0.05	0.0125	0.0125	3.28E+06	0.458	0.7	-0.005	-135.7	24 h
Ensayo 7	0.05	0.00625	0.00625	5.19E+06	0.426	-6.4	0.018	28.6	78 h

Tabla 4: coeficientes de arrastre obtenidos mediante la variación del tamaño de malla

Con estos valores obtenidos de las simulaciones, se realiza la gráfica de convergencia correspondiente al nuevo modelo en situación fija respecto al túnel de viento virtual: (**Figura 31**)

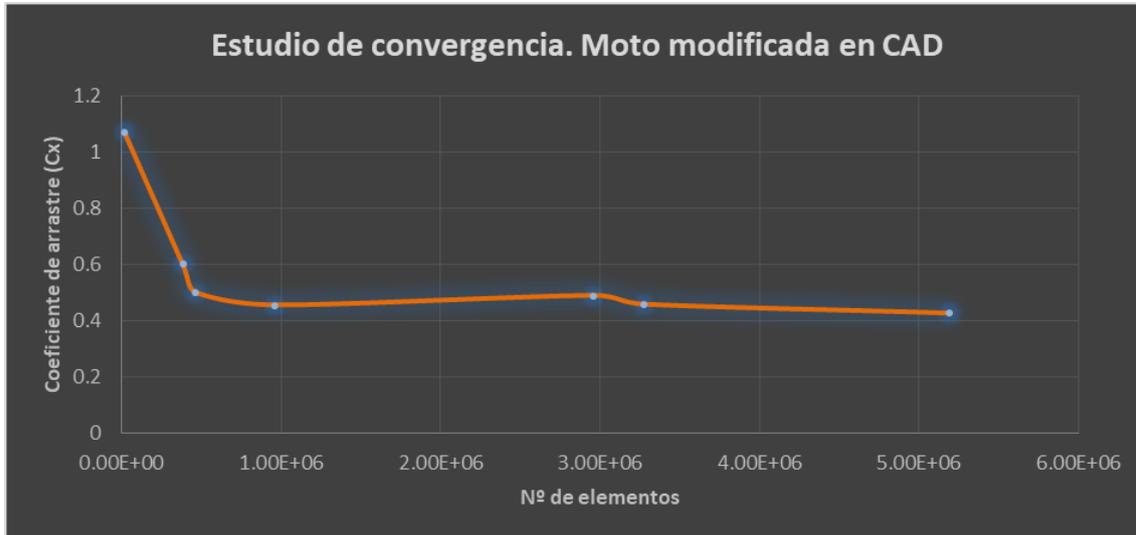


Figura 31: gráfica de convergencia del nuevo modelo de Honda™ RS en situación fija respecto al túnel

En la gráfica obtenida se puede observar que al llegar al valor de 1 millón de elementos de tamaño de malla, el valor del coeficiente de arrastre no varía en gran medida. El único valor que varía aunque de forma no muy extensa es el que hace referencia al tamaño 0,05 m en **RS (Resolved Scale)**, y 0,0125 m en Target **TRS (Target Resolved Scale)**. Esta variación en ese tipo de mallado puede deberse a varias causas, pero la principal es que sólo existe una región de transición entre el mallado “externo” **RS** y el mallado propio de los elementos que se van a simular **TRS**. También existe una pequeña variación en el último de los valores obtenidos, ya que además de tener 2 regiones de transición, tiene un tamaño de elemento muy pequeño (0,00625 m en TRS) por lo que el valor obtenido es el que va a ser utilizado debido a su gran fiabilidad en la simulación.

Se toma el valor del coeficiente de arrastre cuyo tamaño de referencia **RS** es 01 m y cuyo **TRS** es 12,5 mm. Se eligen estos valores ya que el tiempo de simulación no es demasiado amplio y el valor final de los parámetros aerodinámicos es de una fiabilidad aceptable, puesto que el error respecto al Ensayo 6 es del 0,7%, un error mínimo.

Los valores obtenidos en esta simulación y sus desviaciones típicas se pueden observar en la **Tabla 5**:

	Cx	Cy
Promedio	0.455	0.014
Desviación típica	0.010	0.011

Tabla 5: valores obtenidos en la simulación RS 0,1 y TRS 0,0125

El valor promedio del coeficiente de arrastre obtenido es de **0,455** con una desviación típica de **0,01**. Esto quiere decir que es un valor muy estabilizado en la simulación. Este valor del coeficiente de arrastre, es multiplicado por el área frontal de referencia de la motocicleta obtenida en el apartado anterior y se obtiene el coeficiente verificable en las tablas de referencia de motocicletas [3]:

$$C_{xA} = 0,455 * 0,427 = \mathbf{0,194}$$

Este valor obtenido es muy similar al valor del coeficiente de arrastre presente en la **Tabla 1** del apartado “aerodinámica en motocicletas” de esta misma memoria cuyo valor es de 0,20 para la moto Honda™ 1990 RS 125 muy similar a la utilizada en la simulación. Por lo tanto el resultado puede darse como válido para esta simulación.

Además, es importante obtener también el coeficiente de sustentación de la misma simulación que en el coeficiente de arrastre, ya que más tarde es comparada con la sustentación obtenida mediante las implementaciones.

Este valor promedio del coeficiente de sustentación es de **0,014** con una desviación típica de **0,011**. Es decir, la moto tiene una sustentación positiva, algo a evitar puesto que en ese caso la moto tenderá a elevarse produciéndose “caballitos” que hagan perder estabilidad en aceleración. Además, la desviación típica obtenida tiene un valor absoluto similar al promedio por lo que no es de gran fiabilidad. Esto es debido a que el coeficiente de sustentación no es un parámetro muy estable en las motos ya que como se ha visto tiene una importancia relativamente baja en el motociclismo.

5.3.2 Convergencia con nuevo modelo dinámico

En este apartado se explica y se presentan los resultados obtenidos en la simulación que mejor se asemeja a la realidad realizada hasta el momento. En ella, el carenado y el piloto se mantienen fijos pero las ruedas giran respecto a su eje como lo harían en una situación real de movimiento lineal de la motocicleta.

Se realiza también una gráfica de convergencia para observar si existen cambios apreciables entre el modelo fijo realizado en el apartado anterior y el modelo dinámico actual. Además de compararlo también con el modelo inicial y se observan las diferencias existentes, verificando los resultados con la referencia inicial.

Los resultados obtenidos para los distintos valores de tamaño de malla son los que se pueden observar en la **Tabla 6**:

Estudio de convergencia. Moto con ruedas en movimiento									
Ensayos	Resolved scale (m)	Target resolved scale (m)	Wake resolution (m)	Nº elementos	Cx	% Error	Cy	% Error	t cálculo
Ensayo 1	0.3	0.15	0.15	1.90E+04	1.223	153.2	-0.717	-71800	8 min
Ensayo 2	0.1	0.05	0.05	3.84E+05	0.556	15.1	0.021	2000	1.5 h
Ensayo 3	0.1	0.025	0.025	4.68E+05	0.493	2.1	0.053	5200	4 h
Ensayo 4	0.1	0.0125	0.0125	7.99E+05	0.483	0.0	0.001	0	23 h
Ensayo 5	0.05	0.025	0.025	2.96E+06	0.477	-1.2	0.036	3500	14 h
Ensayo 6	0.05	0.0125	0.0125	3.28E+06	0.474	-1.9	-0.023	-2400	24 h
Ensayo 7	0.05	0.00625	0.00625	5.15E+06	0.406	-15.9	0.022	2100	140 h

Tabla 6: *coeficientes de arrastre obtenidos en las simulaciones del nuevo modelo con las ruedas girando*

Como se puede observar, el tiempo de simulación aumenta de forma exponencial respecto a la disminución del tamaño de elemento. Existen límites en la disminución del tamaño de malla impuestos por estos valores de tiempo de simulación, ya que no es necesario obtener un valor muy preciso si para ello se necesitan grandes tiempos de simulación.

Con estos resultados se obtiene también la gráfica de convergencia de los mismos, comparando el coeficiente de arrastre respecto al número de elementos (**Figura 32**)

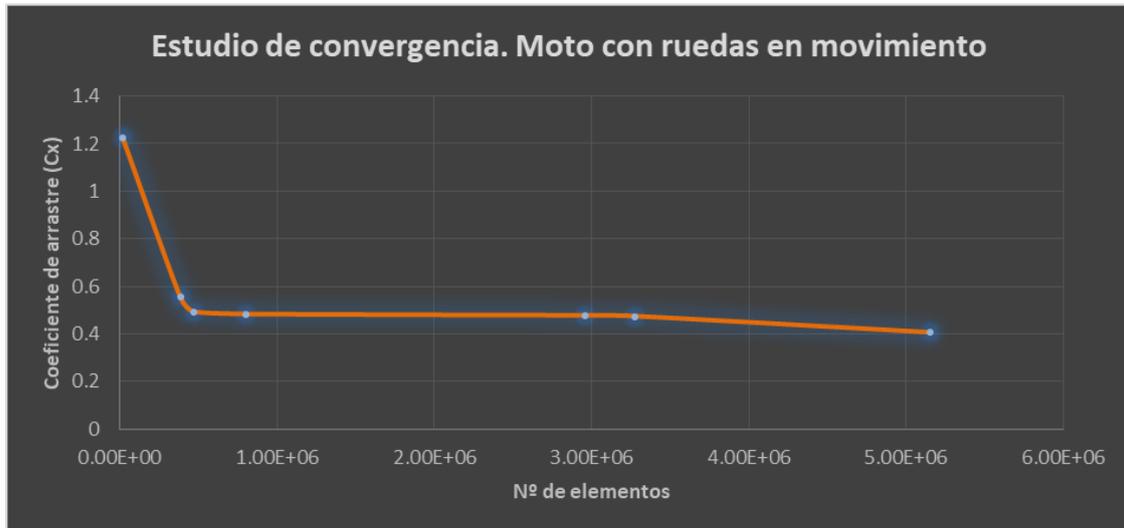


Figura 32: gráfica de convergencia de Honda™ RS con las ruedas girando

En esta simulación, se producen grandes turbulencias en las zonas cercanas a las ruedas (**Figura 33**), ya que las partículas del aire toman en las inmediaciones de la rueda sentido opuesto a la velocidad general del debido al movimiento de las ruedas respecto al movimiento del aire en la simulación..

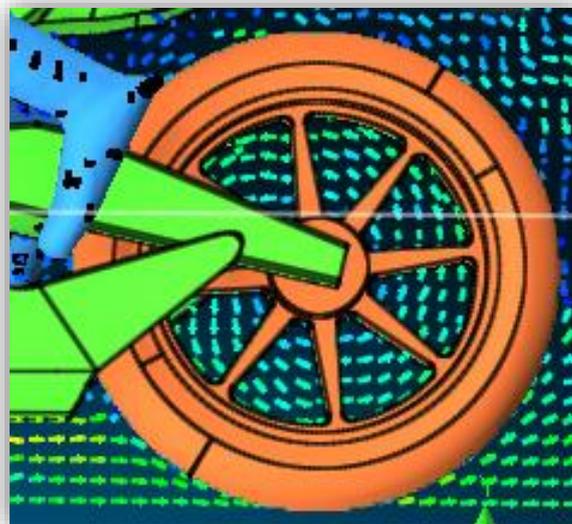


Figura 33: vectores velocidad de las partículas de aire en Xflow™

Por ello, para esta simulación sí que es necesaria la disminución del tamaño de elemento para poder captar con mayor fiabilidad ese movimiento de las partículas de aire respecto a las ruedas y demás elementos importados.

Además, en la última simulación existen 3 regiones de transición desde el tamaño de elemento general del túnel de viento (0,05 m RS) y el tamaño de elemento particular de los elementos importados (0,00625 m TRS). Esto quiere decir que la transición entre las distintas zonas del túnel de viento se hace de forma homogénea y por ello los resultados finales son de mayor fiabilidad.

Pero con la disminución de tamaño de elemento, el tiempo de simulación se comporta de forma inversamente proporcional. Es decir, al disminuir el tamaño de elemento el tiempo de simulación aumenta de forma exponencial, pasando a ser en el Ensayo 7 de 140 horas. Este tipo de ensayos no son efectivos en el momento en el que se introducen nuevas variables en la simulación como se va a observar en el siguiente apartado, por lo que el tamaño de elemento utilizado es el mismo que en simulaciones anteriores. Es decir, el de **RS** 0,1 m y **TRS** 0,0125 m.

El resultado final para la simulación con dichos parámetros impuestos es el que se puede observar en la **Tabla 7**:

	Cx	Cy
Promedio	0.483	0.001
Desviación típica	0.016	0.019

Tabla 7: *promedio y desviación típica de los parámetros aerodinámicos con la moto en situación real*

El resultado final del coeficiente de arrastre es multiplicado como en los casos anteriores por el área frontal de referencia para compararlo con el valor inicial presente en la tabla de motocicletas del apartado “aerodinámica en motocicletas” de esta misma memoria [3]:

$$C_{xA} = 0,483 * 0,427 = \mathbf{0,206}$$

El valor obtenido es también muy similar a los obtenidos anteriormente. La variación producida puede deberse a la mayor exactitud de la simulación realizada en este último caso.

El resultado puede darse como válido ya que es muy similar al obtenido en la tabla de coeficientes de arrastre para la moto utilizada, que como se ha visto anteriormente ese valor es de **0,20**.

El coeficiente de sustentación, sin embargo tiene una gran variabilidad, y su promedio está muy próximo al valor 0 de sustentación por lo que las posteriores implementaciones que se van a realizar deben producir un aumento del coeficiente de sustentación negativo. Es decir, se deben obtener valores negativos de sustentación con los desarrollos implementados para que tengan validez.

ALERÓN AIRFOIL GOE-462

6 ALERÓN AIRFOIL GOE 462

El siguiente apartado describe y justifica la implementación del alerón Airfoil GOE 462 en el carenado utilizado en el proyecto. El Airfoil GOE 462 es un diseño de alerón procedente de la Fórmula 1™, y la forma de trabajo utilizada es la expuesta en el apartado 3 de la memoria y que se explica mediante un resumen en este apartado.

En primer lugar, se obtiene el nombre del alerón mediante la búsqueda de información en la red. Tras ello se comprueba la veracidad del mismo introduciéndolo en la base de datos de alas **Airfoiltools** [4]. En esta web, se obtiene información acerca de la geometría del alerón y de sus propiedades aerodinámicas (C_L , C_D ambos en función de ángulo de ataque etc).

Tras esta verificación y mediante la tabla de puntos existente en la web se realiza el dibujo del alerón en el programa Solidworks™. Este alerón debe ser ensamblado al carenado de la motocicleta con un ángulo de ataque impuesto y tras ello se realiza la simulación para comparar los resultados respecto al carenado inicial.

6.1 Dibujo en CAD

El dibujo en CAD es realizado por medio de la introducción en Solidworks™ de los distintos puntos adquiridos de la base de datos **Airfoiltools**. Después son unidos por medio de un croquis en el programa de dibujo y por último es añadido un diseño de **endplate**. Este tipo de diseños son utilizados para evitar la turbulencia en el límite exterior de las alas o alerones.

La **Tabla 8** es la tabla de puntos utilizada para realizar el alerón Airfoil GOE-462 [4] y el perfil que se puede obtener mediante ella se puede observar en la **Figura 34**.

Superior		Inferior	
0	0	0	0
0.0123	0.02659	0.01255	-0.00641
0.02465	0.04668	0.02505	-0.00731
0.04941	0.07887	0.05004	-0.00562
0.07424	0.10106	0.075	-0.00044
0.09912	0.11774	0.09994	0.00825
0.14895	0.13962	0.14972	0.03712
0.19887	0.15099	0.19946	0.072
0.29884	0.15524	0.29916	0.11224
0.3989	0.14699	0.39913	0.11599
0.49902	0.13074	0.4992	0.10624
0.59917	0.11049	0.59932	0.09049
0.69935	0.08675	0.69947	0.07075
0.79955	0.0595	0.7996399	0.0485
0.89977	0.03125	0.89982	0.02425
0.94987	0.01712	0.94991	0.01262
1	0	1	0

Tabla 8: coordenadas x e y, de los puntos que forman el perfil del alerón GOE-462

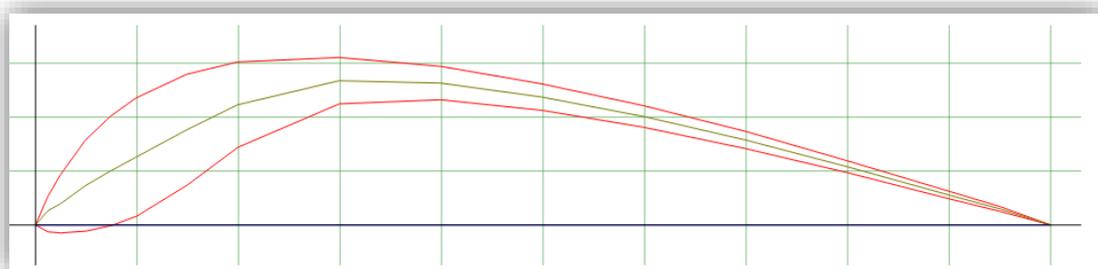


Figura 34: perfil GOE-462

Tras ser dibujado el perfil por medio de dichos puntos, se realiza una simetría del mismo para obtener el perfil en la posición de alerón es decir, en la orientación opuesta a la obtenida por medio de la introducción de los puntos.

Después se extruye ese perfil 100 mm y se realiza sobre su cara externa un perfil de **endplate**. Este diseño aerodinámico sirve para evitar turbulencias en la parte externa de los alerones, el lugar en el que finaliza el perfil y encuentra el

fluido externo. Gracias a este diseño, el flujo recorre el perfil de forma más homogénea que si no existiera el endplate.

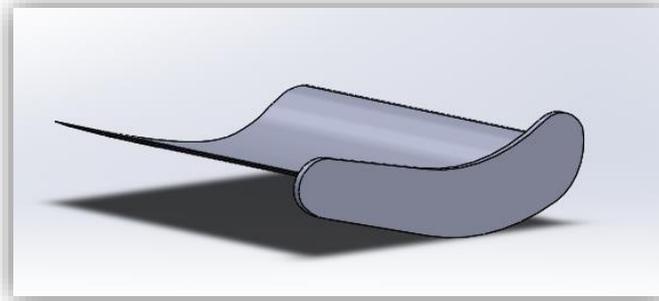


Figura 35: perfil GOE-462 con endplate

Este nuevo desarrollo es instalado en el carenado de la motocicleta en distintas posiciones y con distintas orientaciones para ser simulado y obtener los resultados finales requeridos mediante el método de prueba-error.

6.2 Gráficas de Airfoiltools

Para la realización de estos desarrollos aerodinámicos, se parte de la base de la información obtenida de la base de datos de alas y alerones llamada Airfoiltools. En esta página web, se pueden obtener tanto los puntos mediante los que se dibuja el ala requerida como también las características de estas alas respecto a distintos ángulos de ataque del aire para distintos números de Reynolds utilizados.

El número de Reynolds calculado para este caso, se realiza de la misma manera que como se realizó anteriormente con la motocicleta completa. Sin embargo, en este caso la longitud de referencia es la cuerda del perfil GOE-462.

Esta cuerda, se mide mediante el programa Solidworks™ y el resultado obtenido es de una longitud de 100 mm.

En este caso, el número de Reynolds es el siguiente:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 38,8 \cdot 0,01}{1,2894 \cdot 10^{-5}} = 36862$$

$$\rho(\text{densidad del aire}) = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

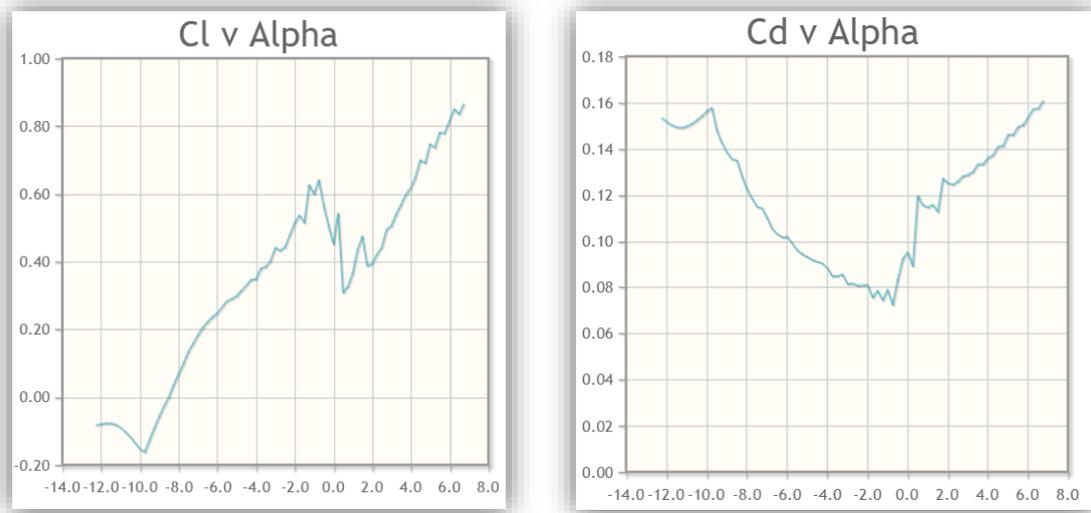
$$v(\text{velocidad del fluido respecto a la moto}) = 38,8 \text{ m/s}$$

$$L(\text{longitud de referencia}) = 0,01 \text{ m}$$

$$\mu(\text{viscosidad dinámica del aire}) = 1,2894 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Con este valor obtenido del número de Reynolds, se impone en la ventana de la página web Airfoiltools [4] que únicamente presente las gráficas para el número de Reynolds más cercano al obtenido, en este caso el número 50.000 (el valor más pequeño presente en la elección).

Las gráficas más representativas para las simulaciones que van a realizarse son las que representan ambos coeficientes respecto a ángulos de ataque distintos (**Figura 36**).



a) Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque

b) Coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque

Figura 36: gráficas obtenidas de la base de datos Airfoiltools para el perfil GOE-462

Como se puede observar, el máximo valor del coeficiente de sustentación es obtenido con el ángulo de ataque de 7° . En cambio, con ese mismo ángulo de ataque se obtiene un coeficiente el máximo valor del coeficiente de arrastre.

Por ello, es necesario valorar el resultado final ya que la mejora obtenida por un lado (sustentación) puede ser contraproducente por otro (arrastre).

Por otra parte, la gráfica utilizada en la comparación posterior frente a las simulaciones, es una gráfica aproximada a la obtenida de la base de datos.

6.3 Simulación en XFlow.

En este apartado, se obtiene una gráfica con los coeficientes de sustentación y arrastre del perfil que se va a utilizar en el desarrollo del carenado. Para ello, se realizan simulaciones con distintos ángulos de ataque y con el número de Reynolds que va a utilizarse en las simulaciones de la moto completa.

El número de Reynolds utilizado es **36862**, obtenido anteriormente. Esta gráfica obtenida se comparará con la gráfica de la base de datos Airfoiltools que se puede observar en la **Figura 36**. Este número permite seleccionar la gráfica de la base de datos y de esta forma se pueden comprobar los resultados mediante simulaciones.

6.3.1 Gráfica obtenida mediante simulación

Para la obtención de la gráfica, se realizan simulaciones del perfil GOE-462 con ángulos de ataque de 0^0 a 10^0 en intervalos de unidad. Los valores obtenidos para el coeficiente de arrastre y el de sustentación se realizan por medio de una media en el intervalo del último tercio de la simulación. Es decir, se realiza la media de los valores obtenidos entre 0.7 y 1 segundo de simulación, instante en el que los parámetros se han estabilizado.

Estas simulaciones son realizadas con dos tamaños de elemento distintos. El primero de ellos, es de 3 mm y permite obtener un resultado que sirva como base para la comparación posterior con las gráficas obtenidas de la base de datos Airfoiltools. El segundo tamaño de elemento, es de 1mm y el tiempo que conlleva para realizar la simulación aumenta exponencialmente. Este tiempo

pasa de ser de 4 horas con el tamaño de 3mm a un tiempo de unos 2 días de simulación para el tamaño de elemento de 1mm.

Ambas gráficas obtenidas con sendos tamaños de malla, se comparan junto con la gráfica de Airfoiltools realizada de forma aproximada para poder ser que se asimile a las demás gráficas de las simulaciones.

Se realizan tablas de 0 a 10 grados de ángulo de ataque para los perfiles aerodinámicos, tanto en el mallado grueso como con el mallado fino. Además, se realiza una tabla extrapolando los datos de la gráfica de Airfoiltools en el intervalo 0-7 (°) ya que no existen valores de ángulos de ataque mayores a 7° en la base de datos. Esto es debido a que el perfil es utilizado en ángulos de ataque en los que el arrastre es mínimo para la sustentación requerida.

Los resultados obtenidos en la simulación del tamaño de elemento 3mm se pueden observar en la **Tabla 9**.

RS-0.1_TRS-0.003125		
Ángulo de ataque (°)	Cx	Cy
0	0,06	-0,36
1	0,07	-0,41
2	0,11	-0,47
3	0,09	-0,47
4	0,09	-0,51
5	0,11	-0,44
6	0,13	-0,58
7	0,11	-0,55
8	0,14	-0,66
9	0,17	-0,72
10	0,20	-0,78

Tabla 9: coeficientes de arrastre y sustentación respecto a ángulos de ataque para tamaño de elemento 3mm

Los resultados para la simulación con tamaño de elemento 1mm son los que se pueden observar en la **Tabla 10**.

RS-0.1_TRS-0.0015625		
Ángulo de ataque(°)	Cx	Cy
0	0,07	-0,21
1	0,08	-0,41
2	0,07	-0,29
3	0,12	-0,47
4	0,11	-0,53
5	0,13	-0,61
6	0,15	-0,62
7	0,13	-0,58
8	0,18	-0,61
9	0,19	-0,76
10	0,22	-0,84

Tabla 10: coeficientes de arrastre y sustentación respecto a ángulos de ataque para tamaño de elemento 1mm

Además, se realiza una extrapolación de los valores de la gráfica de Airfoiltools para poder realizar una tabla y graficar las tres tablas de manera conjunta para poder ser comparada. Estos resultados extrapolados se pueden observar en la **Tabla 11**.

Gráfica Airfoiltools		
Ángulo de ataque(°)	Cx	Cy
0	0,09	-0,42
1	0,12	-0,35
2	0,13	-0,40
3	0,13	-0,50
4	0,14	-0,61
5	0,15	-0,69
6	0,15	-0,81
7	0,16	-0,85

Tabla 11: coeficientes de arrastre y sustentación respecto a ángulos de ataque en Airfoiltools

Las gráficas realizadas con los resultados obtenidos son las que enfrentan los ángulos de ataque con los coeficientes, para que puedan ser comparadas con la gráfica obtenida de la base de datos Airfoiltools.

La primera de las gráficas (**Tabla 12**) representa el ángulo de ataque del perfil frente al coeficiente de arrastre obtenido tanto en las simulaciones como en la base de datos.

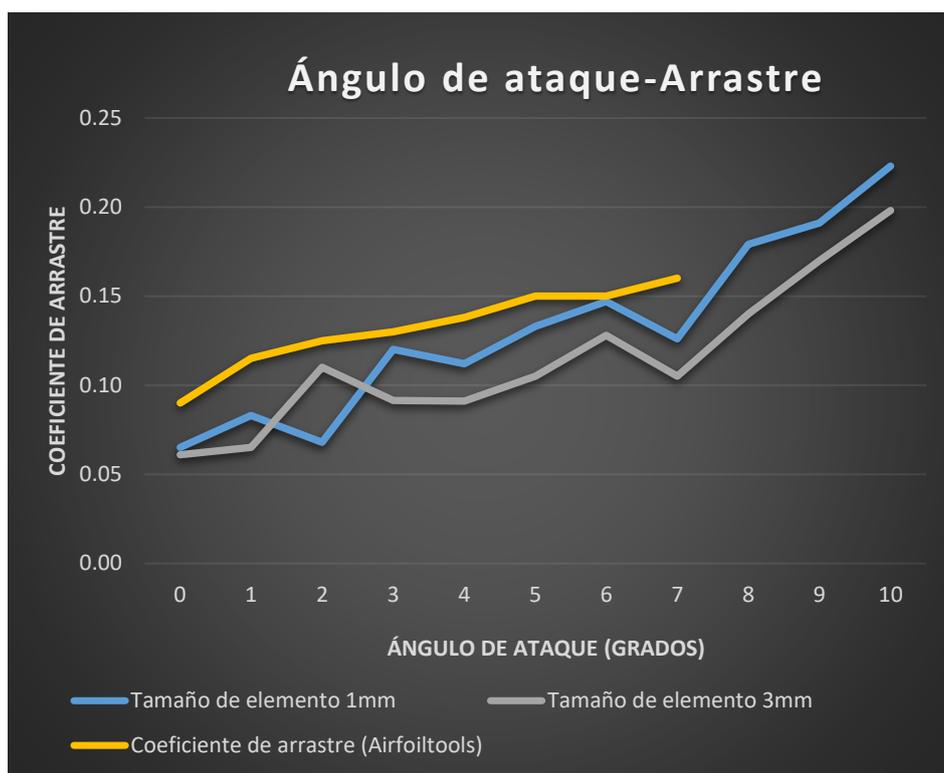


Tabla 12: comparativa de los coeficientes de arrastre frente a distintos ángulos de ataque

La segunda de las gráficas (**Tabla 13**), representa los ángulos de ataque frente a los coeficientes de sustentación de las dos simulaciones realizadas y de los datos de la base de datos Airfoiltools.

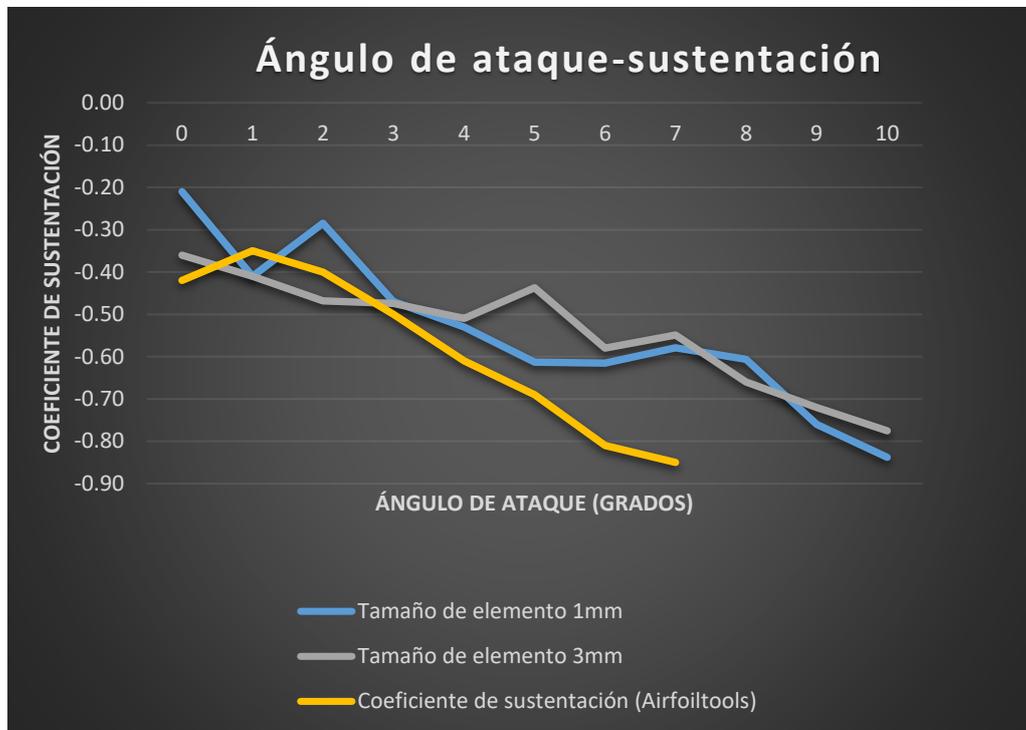


Tabla 13: comparativa de los coeficientes de sustentación frente a distintos ángulos de ataque

6.3.2 Conclusiones

En la **Tabla 12**, se observa que los coeficientes de arrastre obtenidos en las simulaciones se aproximan a los datos extrapolados de las gráficas de Airfoiltools. Por tanto, ambos tamaños de elemento pueden ser utilizados para la obtención del coeficiente de arrastre, pero como es lógico, el tamaño de elemento más pequeño es el que más se aproxima al resultado real.

En cambio, como puede observarse en la **Tabla 13**, los coeficientes de sustentación obtenidos no se aproximan a los obtenidos en la base de datos, ya que es necesario un tamaño de elemento muy pequeño para obtener la sustentación de forma adecuada. Por tanto, los datos obtenidos en las

simulaciones para el tamaño de elemento utilizado aquí, o en su caso tamaños de elemento mayores, no es totalmente representativo de la realidad. Pese a ello, sí puede obtenerse una aproximación a la realidad sin necesidad de tener grandes tiempos de cálculo.

6.4 Instalación del desarrollo en el carenado

Para esta instalación en el modelo, se realiza un croquis que sirve como base para los alerones, cuyo posicionamiento viene determinado por la información obtenida de los alerones implementados en MotoGP™ del año 2016. Esta información tiene absoluta confidencialidad por lo que el posicionamiento es realizado de forma aproximada. Es decir, se observa en fotografías de las motos reales y se instalan los nuevos desarrollos aplicando dicha investigación.

El proyectista se ha basado en la Ducati™ Desmo 16 GP (**Figura 37**), utilizada en el mundial de motociclismo ya que es la motocicleta más representativa en cuanto a la implementación de este tipo de alerones.



Figura 37: *Ducati™ Desmo 16 GP, modelo utilizado para implementar los alerones*

Se coloca el alerón en distintas disposiciones y distintos ángulos de ataque para la posterior observación y verificación de resultados. Los próximos apartados

INSTALACIÓN SIMPLE PERFIL GOE-462
EN LATERAL DEL CARENADO

7 INSTALACIÓN SIMPLE PERFIL GOE-462 EN LATERAL DEL CARENADO

En este apartado, se realiza la instalación simple del perfil GOE-462 en el lateral del carenado para comprobar y verificar los resultados de los distintos coeficientes y finalmente de las fuerzas que se obtienen con distintos diseños implementados.

Se instala un único perfil aerodinámico en cada lateral del carenado, mediante el cual se pretende obtener una mejora sustancial en la sustentación de la moto. Es decir, implementando estos desarrollos se quiere que el conjunto vea afectadas sus condiciones aerodinámicas obteniendo los resultados previstos. Esto se realiza con tres disposiciones distintas del perfil en el carenado y se observan los resultados finales de las simulaciones para tomar una decisión.

7.1 Realización del croquis para la instalación

Se realiza la instalación del perfil aerodinámico, en una posición similar a la observada en las moto Ducati™ Desmo 16 GP del campeonato de MotoGP™ del año 2016. El ángulo de ataque utilizado es el que mayor sustentación obtiene en las simulaciones realizadas y con la verificación obtenida en el apartado del estudio del perfil GOE-462. Este valor del ángulo de ataque es de 10 grados.

Como ya se ha comentado, el estudio de mejoras aerodinámicas puede tener ciertos conceptos técnicos que ayuden a obtener un resultado final adecuado pero la forma de trabajar es la de prueba y error. Por tanto, deben estudiarse distintas posiciones para el par de perfiles que se van a instalar y cuyos resultados en las simulaciones deben ser comparados para finalmente obtener un diseño adecuado.

En primer lugar, como ya se ha comentado se realiza una instalación simple de un par de perfiles. Esta instalación puede estar dispuesta en distintas

posiciones, por lo que es necesario tomar una referencia a partir de la cual se toman las cotas que definirán las posiciones de los perfiles.

La referencia utilizada es el punto inferior de la parte frontal del carenado. Como se puede observar en la **Figura 38** se estudian tres disposiciones para el perfil utilizado. La primera de las disposiciones, que será nombrada como inferior, está situada a 340 mm de la referencia. La segunda, nombrada como disposición intermedia, estará situada 60 mm por encima de la inferior y por último la disposición superior estará situada a 60 mm de la intermedia.

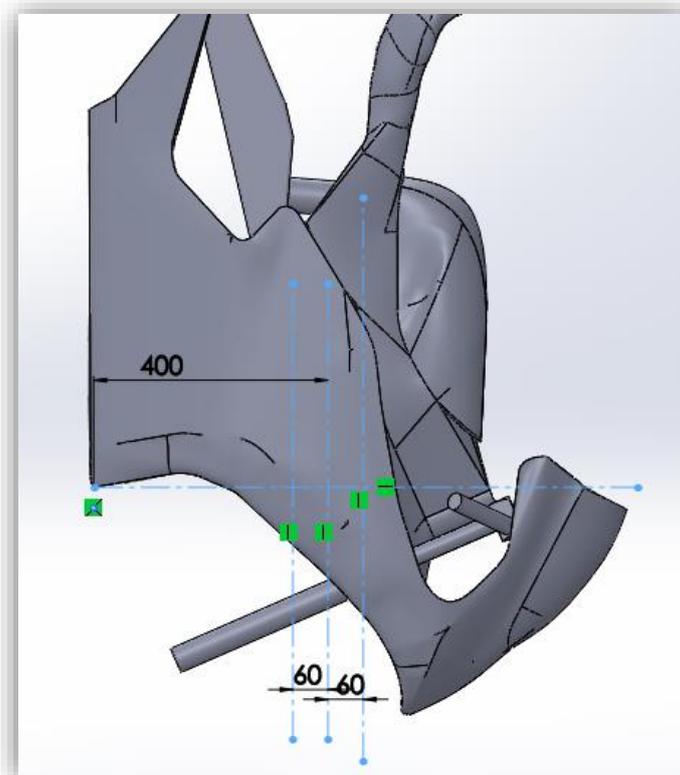


Figura 38: punto de referencia y cotas del eje vertical del carenado

En la **Figura 39** se puede observar la cota en dirección horizontal del plano frontal al carenado. La cota no pertenece al grupo de números enteros debido a que es la distancia real obtenida al acotar desde el centro hasta el interior del carenado, lugar en el que son instaladas las alas para realizar la simulación.

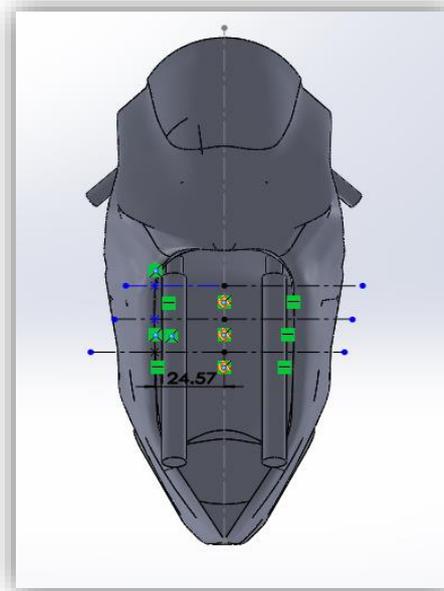


Figura 39: *disposiciones de las tres posiciones posibles del alerón*

Por último, la **Figura 40** describe el ángulo de ataque utilizado en las tres disposiciones del perfil GOE-462. Este ángulo de ataque es de 10 grados debido a que -como ya se ha visto en el apartado anterior- se obtiene en él, el mayor valor de la fuerza de sustentación.

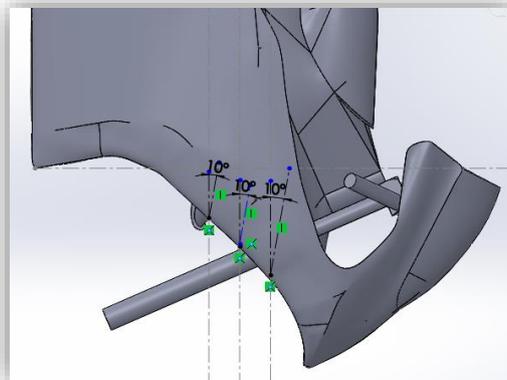


Figura 40: *ángulo de ataque utilizado en las disposiciones del perfil*

Con este croquis realizado en el programa Solidworks™ se puede pasar al siguiente paso que es la instalación del diseño del perfil aerodinámico en los distintos croquis dibujados en planos del carenado.

Disposiciones utilizadas en simulación

Para comparar los distintos diseños que pueden ser implementados mejorando las características aerodinámicas del carenado de la motocicleta utilizada.

Estos nuevos desarrollos se simulan por separado, utilizando las distintas alturas para la colocación de los perfiles en el carenado. Como se observa en la **Figura 41**, los perfiles son instalados en las alturas propuestas en el croquis. La disposición inferior a 340 mm, la intermedia a 400 mm y la superior a 460 mm.

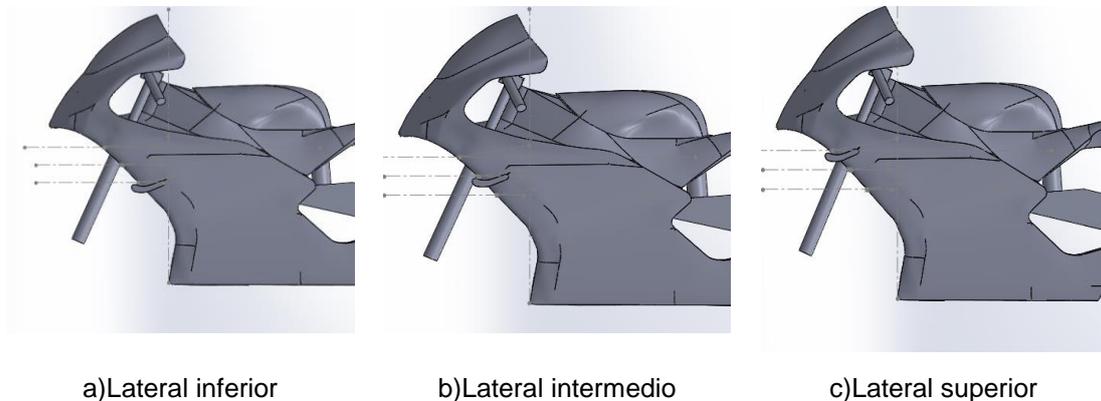


Figura 41: Disposiciones instaladas en el carenado

La elección final se realiza por medio de la prueba y error, ya que el resultado de las simulaciones no puede ser conocido a priori debido a la variación existente en los parámetros aerodinámicos durante las simulaciones.

7.2 Preproceso

Para la realización de la simulación, se utiliza un tamaño de elemento ya empleado en simulaciones anteriores pero añadiendo una región de mallado que

sirve para utilizar en ella un tamaño de elemento más pequeño. El método de trabajo es el mismo en las tres simulaciones que se realizan en este apartado, por lo que el pre proceso es el mismo. Únicamente cambia la disposición de las regiones de remallado que permiten un menor tamaño de elemento en su interior.

El remallado en la región implementada en la simulación permite obtener valores más precisos de los parámetros disminuyendo el tamaño de elemento en su interior. Es decir, el valor de **RS** es de 0,1 m, mientras que el valor de **TRS** es de 0,0125 m. Estos son los tamaños de elemento generales tanto del túnel de viento como de la moto y sus componentes. Además de esto, se añade un valor de remallado en la región instalada de 0,00625 m como se puede observar en la **Figura 42**.

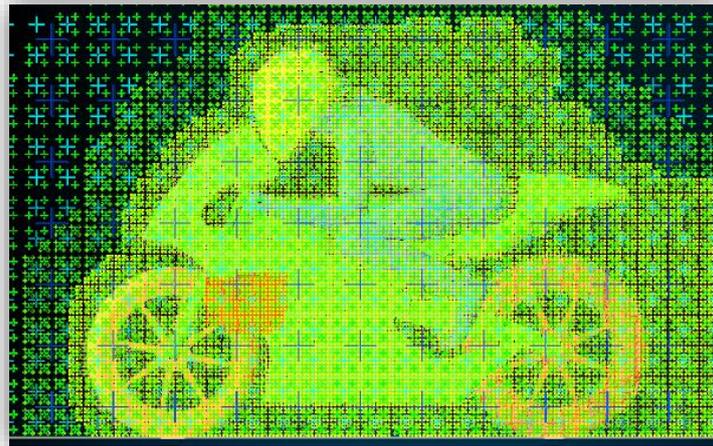


Figura 42: mallado utilizado para la simulación de los desarrollos laterales

Este menor tamaño de elemento, permite obtener una mayor apreciación en los resultados de la sustentación y arrastre de los alerones implementados. Los resultados de las simulaciones pueden mejorarse pero los tiempos de simulación utilizados son demasiado amplios debido a los ordenadores utilizados en el proyecto. Por lo tanto, los resultados obtenidos en esta simulación pueden servir como base para una posterior simulación más precisa pero debido al tiempo requerido y a los ordenadores utilizados, este tipo de simulaciones se decide que no sean realizadas.

7.3 Resultados obtenidos

Una vez realizadas las simulaciones de las tres disposiciones, se comparan los resultados y se decide cuál de ellas es la que mejores características aerodinámicas obtiene para poder ser implementada en un carenado real.

7.3.1 Disposición inferior

La primera de las disposiciones es la instalada en la parte inferior del croquis. Es decir, a 340 mm del punto inferior del carenado, desde el que se parte para dibujar el croquis.

La simulación se ha realizado con un tamaño de elemento inferior en una región localizada en los perfiles aerodinámicos implementados como se puede observar en las **Figura 42** y **Figura 43**. Este tamaño de elemento es de 6mm, un tamaño que permite obtener ciertas conclusiones aunque no de manera precisa. Sería necesario reducir el tamaño de elemento tanto general como en la región para verificar de forma más precisa la simulación.

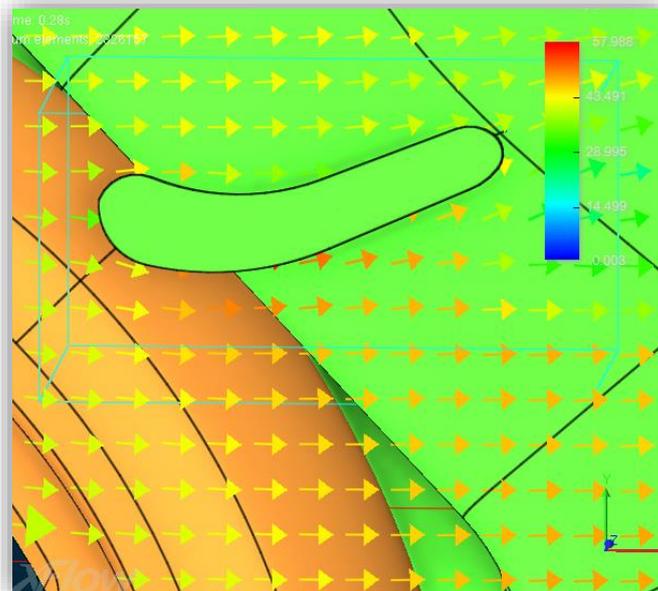


Figura 43: vectores simulando la trayectoria y velocidad del aire en las inmediaciones del desarrollo implementado

Los resultados obtenidos en esta primera simulación se pueden observar en la **Tabla 14**

	Cx	Cy
Promedio	0.479	-0.021
Desviación típica	0.016	0.015

Tabla 14: Promedio y desviación típica de los parámetros en la disposición inferior

En esta primera simulación de la disposición inferior, el valor obtenido para el coeficiente de arrastre es de 0,479 mientras que el del coeficiente de sustentación es de 0,021 en sentido hacia el suelo.

7.3.2 Disposición intermedia

La segunda de las disposiciones instaladas en el carenado para los perfiles GOE-462 es la disposición intermedia. Esta disposición está situada a 400 mm del punto inferior del carenado como se puede observar en la **Figura 44**, situación que es simulada para apreciar posibles cambios en los parámetros aerodinámicos respecto al resto de simulaciones.

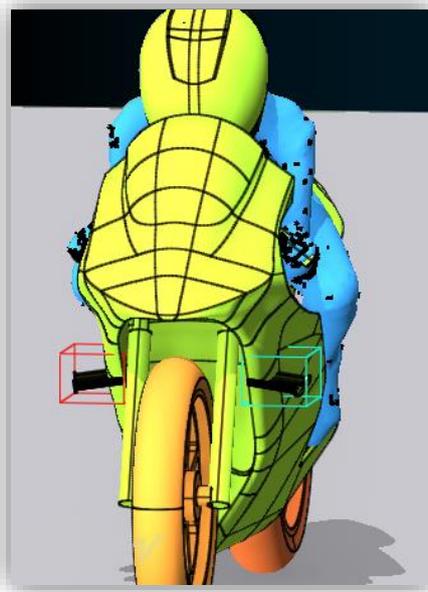


Figura 44: vista gráfica de la disposición intermedia en Xflow™

Los resultados obtenidos en la simulación para esta disposición son los descritos en la **Tabla 15**:

	Cx	Cy
Promedio	0.454	-0.006
Desviación típica	0.018	0.020

Tabla 15: Promedio y desviación típica de los parámetros en la disposición intermedia

La segunda simulación, produce un coeficiente de arrastre de 0,454 y un coeficiente de sustentación de 0,006 en sentido negativo, es decir, tiende a pegarse al suelo.

7.3.3 Disposición superior

Por último, se realiza la simulación de la disposición superior. Esta disposición está situada a 460 mm del punto inferior del carenado, lugar donde se sitúa también la región de remallado como en las simulaciones anteriores.

Los resultados obtenidos para esta simulación son los que se describen en la **Tabla 16**:

	Cx	Cy
Promedio	0,458	-0,027
Desviación típica	0,019	0,018

Tabla 16: Promedio y desviación típica de los parámetros en la disposición superior

En esta última simulación, el coeficiente de arrastre es similar a los resultados anteriores con un valor de 0,458. Sin embargo, el coeficiente de sustentación es de 0,027 en sentido negativo, por lo que resulta un aumento significativo en la sustentación producida.

7.4 Conclusiones

Como primera conclusión, se observa que el coeficiente de arrastre obtenido en las tres simulaciones es similar entre ellas y también muy similar al obtenido en la simulación de la moto en situación dinámica que se ha realizado en un apartado anterior.

Por otra parte, también se puede apreciar que en los tres tipos de desarrollo se obtiene una sustentación negativa. Por lo tanto, las implementaciones en los tres casos han alcanzado la finalidad para la que estaban desarrolladas.

En cuanto a la elección del desarrollo adecuado según los resultados obtenidos, se puede expresar que el carenado más adecuado para obtener cierta sustentación en la situación de aceleración en recta sea el que tiene el desarrollo situado en la disposición superior.

Este desarrollo obtiene un valor de coeficiente de sustentación de 0,027 con una desviación típica de 0,019. Esto quiere decir, que los valores obtenidos varían de forma considerable respecto al valor absoluto del coeficiente obtenido.

Sin embargo, estos valores ratifican que en todo momento la moto tiene una sustentación negativa a la velocidad de 38,8 m/s. Por tanto, el desarrollo cumple con el objetivo aerodinámico de aumentar la sustentación y de esta forma evitar el caballito que produce la moto en aceleración a altas velocidades y además no se produce un aumento del coeficiente de arrastre considerable.

INSTALACIÓN DE PERFIL GOE-462
EN FRONTAL DEL CARENADO

8 INSTALACIÓN DE PERFIL GOE-462 EN FRONTAL DEL CARENADO

La instalación que se estudia en este apartado es un desarrollo específico de una marca de MotoGP®, por lo que las simulaciones realizadas han de ser realizadas al detalle. En el caso que concierne a este proyecto, las simulaciones no pueden realizarse de manera óptima debido a que los tiempos de simulación son de un intervalo demasiado prolongado y además la tecnología utilizada no es la más adecuada para su realización ya que se utilizan ordenadores algo obsoletos para este tipo de trabajos.

8.1 Disposición utilizada

Este diseño, se realiza tomando como referencia la Ducati™ Desmo 16 GP (**Figura 37**) cuyos alerones se encuentran instalados en la zona frontal del carenado como se puede observar en la instalación ya realizada en la **Figura 45**. Este tipo de desarrollo es utilizado únicamente por el equipo Ducati™ debido a la gran tendencia de esta moto para producir caballitos. Es decir, al acelerar, la moto tiende a levantar la rueda delantera perdiendo estabilidad y adherencia a la salida de las curvas.

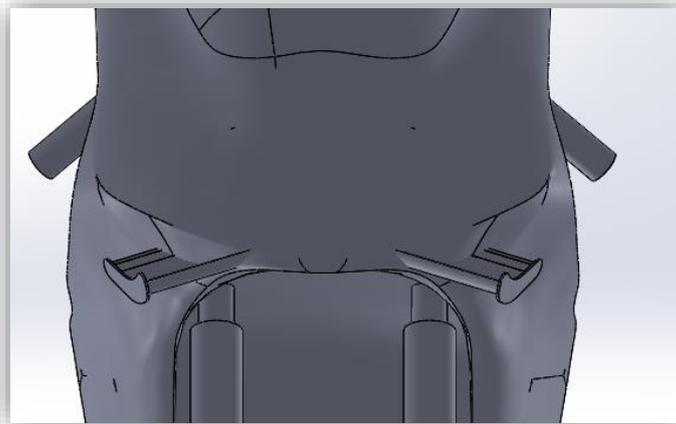


Figura 45: *vista frontal de los desarrollos implementados*

La disposición que se ha utilizado es similar a la que ha podido observarse en la Ducati™ Desmo 16 GP. No es posible realizar un dibujo idéntico mediante la ingeniería inversa en el tiempo utilizado. Sin embargo, se va a simular una disposición similar para reflexionar sobre los resultados obtenidos.

8.2 Preproceso

La simulación realizada, utiliza como **Resolved Scale** de 0,2 m y como **Target resolved scale** 0,0125 m. Es decir, el mallado general del túnel de viento es de 20 cm y el tamaño de elemento utilizado para la moto es de 1,25 cm.

Además, se realiza una única región- como se puede observar en la **Figura 46** región cuyo tamaño de elemento es de 0,625 cm, para obtener con mayor precisión la sustentación que proporcionan los perfiles implementados.

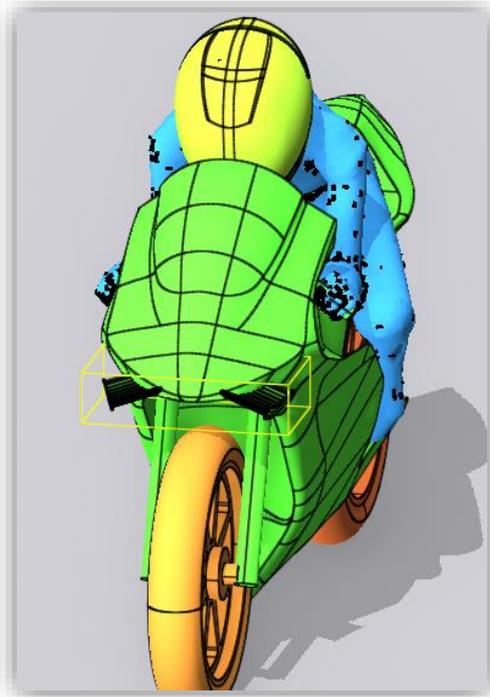


Figura 46: disposición frontal de los desarrollos implementados. Vista gráfica en Xflow™

El resto de la simulación es equivalente a la realizada en el apartado del nuevo modelo base. Es decir, se realizan los giros de las ruedas para que la

moto tuviera una velocidad de 38,8 m/s, con un túnel de viento de 15x4x6 m y cuyo suelo es fijo.

8.3 Resultados de la simulación

La simulación realizada tiene como referencia el valor de sustentación nulo de la moto en situación dinámica. Como se puede ver en el apartado que hace referencia a ello, el valor de la sustentación es próximo a cero.

Partiendo de esta base, se realiza la simulación de la motocicleta con el nuevo desarrollo frontal. Los resultados obtenidos en la simulación se pueden observar en la **Tabla 17**:

	Cx	Cy
Promedio	0.467	0.007
Desviación típica	0.016	0.017

Tabla 17: *promedio y desviación típica de los parámetros con la implementación de los desarrollos frontales*

8.4 Conclusiones

Como primera conclusión de este desarrollo, se puede comentar que el valor medio del coeficiente de arrastre es similar al de la simulación del carenado inicial en situación dinámica. Esto es debido a que los alerones implementados no aumentan el área de referencia ni tampoco influyen de manera drástica en el comportamiento del flujo de aire respecto a la moto, y por ello el resultado final del coeficiente de arrastre es similar como era de esperar.

Respecto al coeficiente de sustentación, el valor promedio es un valor positivo, e incluso en mayor medida que el de la moto sin estos desarrollos. Por tanto, se puede concluir que para este tipo de desarrollos no se ha conseguido probar su beneficio aerodinámico con las simulaciones realizadas.

Esto no quiere decir que no se obtenga un beneficio con estos mismos sistemas, sino que habría que realizar simulaciones más precisas –tamaño de

elemento menor, mayores tiempos de simulación- para obtener una conclusión final que pueda asemejarse mejor a la realidad. También es algo que no se ha podido realizar debido a los recursos utilizados puesto que con mejores ordenadores se podrían conseguir mejores resultados.

CONCLUSIONES

9 CONCLUSIONES

En este apartado, se exponen en dos subapartados explicando las conclusiones del trabajo y otro de ellos con los desarrollos futuros. Por un lado, están las conclusiones generales del trabajo de fin de grado realizado. Por otro lado, se encuentran las conclusiones particulares obtenidas en el trabajo. Y en último lugar, están las posibles mejoras para futuros proyectos que se comentan en el tercer subapartado.

9.1 Conclusiones generales

En primer lugar, este trabajo fue seleccionado por el proyectista para poder conocer nuevas ramas de la ingeniería que no habían podido ser vistas en profundidad como podía ser la simulación de CFD. Al finalizar el proyecto se puede concluir que el objetivo general del proyectista ha sido cumplido puesto que ha conocido de primera mano el funcionamiento de este tipo de herramientas en una situación de investigación real.

En segundo lugar, este trabajo también ha servido para trabajar en equipo, principalmente con el compañero Sergio Alfaro Ezcurra, con el que conjuntamente se han tenido que solventar una gran cantidad de problemas surgidos con los programas tanto de CFD como de dibujo en 3D entre otros.

Por último, aunque no directamente relacionado con el trabajo, el proyecto Motostudent™ también ha servido para poder asimilar el proyecto al trabajo en una empresa puesto que pese a no poder llevar a cabo finalmente el proyecto. Un ejemplo de ello ha sido el tiempo invertido en la búsqueda de patrocinadores, tanto por medio de llamadas a distintas empresas y proveedores de piezas, como con reuniones en algunos casos, la realización de movimientos en redes sociales etc.

En general, este trabajo ha servido para dar un paso más en el ámbito universitario y acercar más el trabajo realizado por el estudiante a la realidad del mundo laboral. Por lo tanto, el objetivo general ha cumplido las expectativas y

sirve como punto de partida para una futura carrera en el mundo laboral. Además, se han obtenido conocimientos de un programa de CFD en el apartado aerodinámico para poder trabajar con él en un futuro, algo que de otra manera no se hubiese conseguido puesto que no hay una asignatura en el grado de ingeniería mecánica que imparta este tipo de aplicaciones del programa de CFD.

9.2 Conclusiones particulares del trabajo realizado

Las conclusiones particulares de este trabajo son las que hacen referencia a los desarrollos que han cumplido los objetivos para los que han sido propuestos, y las posibilidades de mejora posibles que pudieran implementarse en el futuro.

La primera conclusión obtenida del trabajo es que un mallado más fino no implica directamente unos mejores resultados a nivel de simulación, ya que los resultados se estabilizan como se ha comprobado en el estudio de convergencia. Por lo tanto, la realización de un modelo de convergencia para las distintas situaciones desarrolladas en este trabajo ha servido como un punto de referencia óptimo en el cual partir en las posteriores simulaciones.

Los resultados obtenidos en las simulaciones de convergencia con el mallado final utilizado **RS (Resolved Scale)** 0,1 m y **TRS (Target Resolved Scale)** 0,0125 m, han dado resultados similares a los obtenidos de la **Tabla 1** de referencia y con un tiempo de simulación cercano a las 8 horas en todas las simulaciones. El tiempo de simulación es un parámetro crítico puesto que más tarde se añaden regiones de refinamiento en las simulaciones que aumentan exponencialmente el intervalo de tiempo en la simulación, y una simulación de 8 horas en el modelo base y el nuevo modelo realizado es un valor admisible para las posteriores simulaciones a realizar.

Como ya se ha comentado, el desarrollo en la parte frontal el carenado no ha obtenido los resultados aerodinámicos esperados, puesto que a priori era el sistema que debería dar un salto cuantitativo en el parámetro de sustentación. Sin embargo no ha ocurrido por lo que una propuesta de mejora sería realizar un

mallado general más fino para obtener resultados más próximos a la realidad y en caso de que siga sin obtenerse resultados, cambiar a otro perfil aerodinámico distinto que aporte mayor sustentación, o también aumentar la escala del perfil actual implementado.

En cuanto a los desarrollos en los laterales del carenado, se ha comprobado que el perfil GOE-462 en la disposición superior diseñada es el que mejores resultados aerodinámicos ha obtenido para la simulación realizada. Esto da cierto valor a la propuesta de desarrollo pero se debería seguir investigando en condiciones de trabajo lo más cercanas a la realidad posibles. Por ejemplo, tomando tamaño de elemento mucho más pequeño, realizando simulaciones en curva con estos elementos implementados para verificar sí es o no contraproducente en esa disposición etc.

9.3 Desarrollos futuros

Tomando este trabajo como punto de partida, pueden realizarse numerosos estudios a partir de él. Entre estos numerosos estudios que pueden realizarse se pueden encontrar el estudio de los alerones implementados pero en distintas posiciones de la moto como puede ser en curva, en frenada, en aceleración etc. Algo que implica distintas velocidades del viento y con las que el comportamiento del alerón puede variar respecto al propuesto en este trabajo.

También aportaría valor la realización de un mallado más fino en las simulaciones, ya que la sustentación obtenida en el perfil aerodinámico en las simulaciones no se aproxima demasiado a la realidad. Esto es así, debido a que es necesario un tamaño de elemento más pequeño en el perfil aerodinámico para obtener resultados similares a la realidad.

Por último, sería de gran utilidad la realización de pruebas en túnel de viento para la comparación y verificación de los resultados de las simulaciones respecto a los resultados reales del prototipo. De esta forma se obtienen datos reales de los parámetros estudiados en las simulaciones y pueden ser verificados.

BIBLIOGRAFÍA

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Universidad Politécnica de Madrid; “*Mecánica de Fluidos I*”; Jaime Beneyto Gómez de Barreda (2012); Recuperado el 14 de Marzo de 2017 de <http://servidorda.aero.upm.es/wip/apuntes/tercero/mecanica-de-fluidosi/Mec%20E%20nica%20de%20Fluidos%20I%20-%20Beneyto.pdf>
- [2] Wolf-Heinrich Hucho, “*Aerodynamics of Road Vehicles*” (Fourth Edition), SAE Order No. R-177, Society of Automotive Engineers, 1998 refer. Túnel viento
- [3] Tony Foale, “*Motorcycle handling and chasis design*” (Second Edition), ISBN-84-933286-3-4, FOALE, A.E. (1 de marzo de 2006)
- [4] Airfoil Tools; GOE 462 AIRFOIL (goe462-il); Recuperado a 8 de Marzo de 2017 de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe462-il>
- [5] Biblioteca de la Universidad Pública de Navarra. Oficina de Referencia. (2016). Competencias informacionales: buscar, evaluar y utilizar la información. Trabajo de fin de grado en Ingenierías Industriales, Informática y de Telecomunicación. Recuperado el 4 de noviembre de 2014 de <https://miaulario.unavarra.es/portal/site/ci-para-ing-tfg>
- [6] Simon McBeath; “*Aerodinámica del automóvil de competición*” (Primera edición español); ISBN-84-329-1147-X, CEAC (2000)

Firma: