



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y
ESTUDIO AERODINÁMICO
EXPERIMENTAL DEL CARENADO
DE UNA MOTOCICLETA DE
COMPETICIÓN (PARTE II)**

Alumno: José Ángel Moya Muriana

**Tutores: José Ignacio Jiménez González
Carlos Martínez Bazán**

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2014

Agradecimientos

Agradecer a mis directores del trabajo de fin de grado, Carlos Martínez Bazán y José Ignacio Jiménez González, todo el apoyo y la ayuda que me han brindado en este arduo trabajo.

A los técnicos de laboratorio, Agustín Busquets Muñoz y Cosme Juan Galán, que me han dedicado tantas horas y sin los cuales este proyecto no se podría haber llevado a cabo.

A los profesores, Cándido Gutiérrez Montes y Rocío Bolaños Jiménez, que me han dedicado su tiempo y me han resuelto tantas dudas.

A mi profesora, Cristina Martín Doñate, por darme ideas e introducirme en el mundo de la impresión 3D.

A mi familia, que ha estado ahí en todo momento, dándome todo el apoyo y la motivación que necesitaba.

Índice

1 Introducción	4
2 Teoría	5
2.1 Definición de Fluido	5
2.2 Ley de viscosidad de Newton...	6
2.3 El principio de Bernoulli.....	7
2.4 Número de Reynolds.....	8
2.5 Flujo laminar y turbulento.....	9
3 Aerodinámica en motocicletas	11
3.1 Resistencia aerodinámica.....	11
3.2 Evolución de los carenados de competición	20
3.3 Flujo de aire interno.....	26
3.4 Sustentación.....	28
3.5 Evaluación de prestaciones	34
3.6 Estabilidad con viento lateral	36
3.7 Estabilidad direccional en estado de equilibrio	39
3.8 Estabilidad direccional dinámica.....	43
3.9 Resumen	44
4 Fabricación	46
5 Ensayos en el túnel de viento	47
5.3 Velocimetría de imágenes de partículas (PIV).....	47
5.3.1 Principios del PIV.....	48
5.3.2 Aspectos de la técnica PIV	48
5.3.3 Montaje del sistema de PIV.....	59
5.3.4 Toma de fotografías del PIV	63
5.3.5 Procesado de fotografías.....	67
6 Simulación con OpenFOAM	72
6.1 Geometría.....	73
6.2 Malla.....	74
6.3 simpleFoam	85
6.4 Post-procesado	85
7 Resultados	87
7.1 Coeficiente de arrastre, Drag.....	87
7.1.1 Resistencia de un cuerpo bidimensional	87
7.1.2 Análisis dimensional	91
7.1.3 Coeficiente de resistencia	93
7.1.3.1 Incógnitas del problema	94
7.1.3.2 Medida del C_D con PIV	94
7.1.4 Extensión del método.....	95
7.1.5 Integración numérica de resultados.....	95
7.1.6 Estelas y valores de C_D	97
7.1.7 Coeficiente de resistencia en OpenFOAM.....	106
7.2. Descripción cualitativa	109
7.2.1. Zona frontal.....	109
7.2.2 Zona Depósito.....	112
7.2.3. Zona Asiento-Colín	114
7.2.4. Zona final del Colín	115
7.2.5. Zona lateral simétrica 1 (Plano laser a $Z=162$ mm).....	116
7.2.6. Zona lateral simétrica 2 ($Z=162$ mm)	118
7.2.7. Zona lateral simétrica 3 ($Z=162$ mm)	119
7.2.8. Zona lateral simétrica 4 ($Z=162$ mm)	120
7.3 Resultados OpenFOAM	122
7.3.1. Contornos de velocidad	122
7.3.2. Ram-Air	123
7.4. Líneas de corriente.....	127
7.4.1. Zona frontal.....	127
7.4.2 Zona Depósito.....	128
7.4.3. Zona Asiento-Colín	130
7.4.4. Zona final del Colín	132
7.4.5. Zona lateral simétrica 1 (Plano laser a $Z=162$ mm).....	133
7.4.6. Zona lateral simétrica 2 ($Z=162$ mm)	133

mm).....	133	9.1.2-20 Hz lateral	141
7.4.7. Zona lateral simétrica 3 (Z=162		9.1.3-30 Hz lateral	142
mm).....	134	9.1.4-40 Hz lateral	143
7.4.8. Zona lateral simétrica 4 (Z=162		9.1.5-50 Hz lateral	144
mm).....	135	9.1.6-10 Hz desde arriba	145
		9.1.7-20 Hz desde arriba	146
		9.1.8-30 Hz desde arriba	147
		9.1.9-40 Hz desde arriba	148
8 Conclusiones	137		
9 Anexos	139	9.2 Algoritmos de MATLAB.....	149
9.1 Fotografías del PIV	139		
9.1.1-10 Hz lateral.....	139		
9.1.10-50 Hz desde arriba.....	140	10 Bibliografía.....	155

1 Introducción

El tamaño y la forma de una motocicleta – junto con el piloto y cualquier complemento aerodinámico como un carenado , cúpula, etc. – afectan a su resistencia aerodinámica y a su sustentación, y por lo tanto también a su consumo de potencia, tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad. Se han escrito muchos libros dedicados por completo a la aerodinámica vehicular, aquí solo podremos estudiar el tema de forma muy superficial. Muchos de los textos y artículos que se escriben sobre aerodinámica suelen dedicarse a ensalzar las virtudes de tener una baja resistencia aerodinámica y los consiguientes efectos en prestaciones y bajo consumo de combustible. Sin embargo, conseguir crear una motocicleta que sea muy aerodinámica es probablemente la parte mas fácil.

En las motos, al igual que en el resto de vehículos que se mueven a velocidades medias/altas, es muy importante estudiar los efectos que la presión del viento tiene en la estabilidad y la capacidad de control del vehículo, sin embargo, este tema es mucho más complejo en las motocicletas, si comparamos con otros vehículos autoestables como los automóviles. El avance, las reacciones giroscópicas, el acoplamiento entre los movimientos de guiñada e inclinación y su interacción con la dirección, son la causa de muchos problemas de estabilidad y control que no existen en los automóviles, camiones, etc.

Habitualmente, el diseño de los carenados de muchas motocicletas de carretera o de competición, deja mucho que desear. Muchos ingenieros concentran su atención en la parte delantera y descuidan la trasera. En competición, este es el resultado de las rígidas normas de diseños de carenados de la FIM, aparecidas a partir del año 1957. En motocicletas de turismo, los diseñadores suelen copiar los diseños de las máquinas de competición, o piensan sólo en la estética o en proteger al piloto de las inclemencias medioambientales.

En esta parte II del proyecto veremos una amplia introducción general de la aerodinámica en las motocicletas, centrándonos después específicamente en la exposición de la técnica de PIV; calculo del coeficiente de resistencia (C_D), justificando dicho valor con el obtenido mediante CFD; y finalmente en una descripción cualitativa del comportamiento del flujo de aire las inmediaciones a la motocicleta.

2 Teoría

En primer lugar, se estudiarán algunos conceptos de la mecánica de fluidos, para poder comprender mejor los fenómenos aerodinámicos que se verán a lo largo del proyecto.

2.1 Definición de Fluido

Se denomina fluido al sistema de partículas que, a diferencia de los sólidos, no están unidas rígidamente y pueden moverse con una cierta libertad unas respecto de las otras, permitiéndole alterar su forma ante una fuerza. La diferencia entre el fluido líquido y el gaseoso radica en que las partículas que componen un líquido se encuentran más unidas que las de un gas; por esta razón, el volumen del líquido dentro de un recipiente, permanece constante con una superficie límite bien definida, mientras que el gas no posee límite y se difunde en el aire disminuyendo su densidad. En el caso del presente proyecto, el fluido en estudio es el aire.

2.2 Ley de viscosidad de Newton

Una de las resistencias al avance que se encuentra en una motocicleta de competición, es la fuerza ocasionada por la diferencia de velocidades entre dos sólidos con un fluido entre ambos, o incluso entre un sólido y el aire. En el caso de una motocicleta, por ejemplo, es la resistencia entre el colín y el suelo, entre los que hay aire.

Técnicamente hablando, un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante. Una fuerza cortante es el componente de fuerza tangente a una superficie, y esta fuerza dividida por el área de la superficie es el esfuerzo cortante promedio sobre el área. Si el fluido es ideal (no viscoso), no opone ninguna restricción al desplazamiento entre los dos cuerpos, y tendrán una velocidad acelerada entre ambos debido a la fuerza, si el fluido es viscoso, al aplicar una fuerza F , se crea la fuerza cortante que impide el movimiento, con lo que para una fuerza, el desplazamiento entre ambos cuerpos adquiere una velocidad constante.

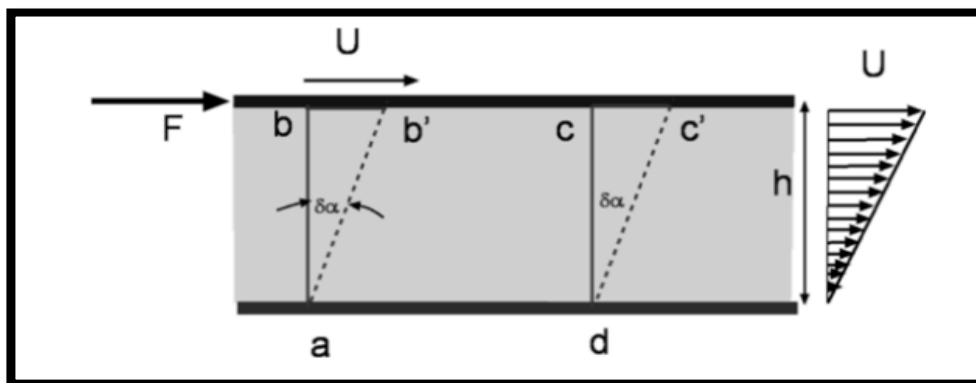


Figura 2.1 : Campo de velocidades de un fluido entre dos placas (www.wikipedia.org)

En la Figura anterior se observa un fluido entre dos placas paralelas separadas una distancia pequeña, siendo ambas placas lo suficientemente grandes para que las condiciones en sus orillas se puedan despreciar. Si suponemos que en la frontera el fluido tiene la misma velocidad que la superficie sólida, condición de no deslizamiento, los experimentos muestran que para unos tipos de fluidos, denominados fluidos newtonianos, la fuerza está dada por la ecuación [2.1]

$$F = \mu * \frac{A * U}{h} \quad [2.1]$$

Si se considera en vez de la fuerza, el esfuerzo cortante y se considera U/h como la velocidad angular de la línea a-b, también se puede expresar la ecuación como:

$$\tau = \mu * \frac{du}{dy} \quad [2.2]$$

Siendo “y” la componente unitaria del vector en la dirección a-b.

El factor de proporcionalidad “ μ ” se denomina viscosidad del fluido. Dicho de manera más general, la viscosidad es una medida cuantitativa de la resistencia de un fluido a fluir.

En la ley de viscosidad de Newton se observa que se ejerce una resistencia al avance de una moto dado que el fluido entre el colín por ejemplo y el suelo tiene una distribución de velocidades a lo largo del eje “y”, aunque se observará que la diferencia de esta resistencia es baja comparada con la resistencia al avance proporcionada por la diferencia de presiones en la superficie del colín.

Según la relación entre la magnitud del esfuerzo cortante y la rapidez de deformación resultante, se clasifican los fluidos como newtonianos o no newtonianos. En el flujo con fluido newtoniano hay una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante (μ constante en la ley de viscosidad de Newton), mientras que en el fluido no newtoniano hay una relación no lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación angular. En el presente estudio se toma el aire como fluido, que se comporta como un fluido newtoniano.

2.3 El principio de Bernoulli.

Uno de los principios más importantes en la mecánica de fluidos y en la aerodinámica de competición es el Principio de Bernoulli, este principio indica que la cantidad de presión estática, más la energía cinética, más la energía potencial se mantienen constante a lo largo de una línea de corriente.

$$p + \frac{1}{2} * \rho * v^2 + \rho * g * z = Cte \quad [2.3]$$

Esta ecuación es válida siempre que:

- Se aplica a una línea de corriente.
- Las fuerzas másicas solo están regidas por la gravedad.
- Efecto de los términos viscosos despreciable.
- Densidad constante.
- Flujo estacionario.

De la expresión se deduce que si la altura es constante en cada instante del fenómeno y si la presión aumenta, la velocidad a de disminuir. Lo mismo ocurre con el área o sección de paso, pues si el área aumenta la velocidad decrece.

Este principio explica por ejemplo, la fuerza que se ejerce sobre distintos cuerpos como la sustentación sobre el ala de un avión. El ala de un avión está diseñada para que el aire en la parte superior del ala fluya más rápidamente que en la parte inferior provocando una disminución de presión en la parte superior y proporcionando una fuerza de sustentación que mantiene el avión en vuelo.

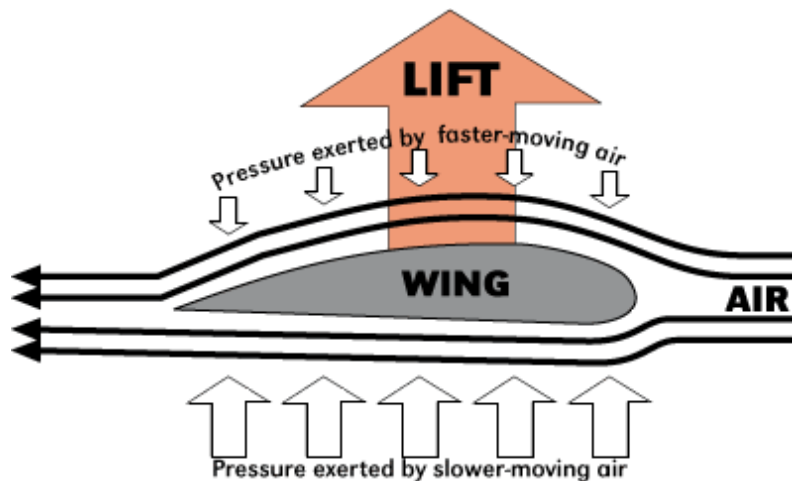


Figura 2.2 :Principio de Bernoulli (www.ffden-2.phys.uaf.edu)

2.4 Número de Reynolds.

El número de Reynolds es un numero adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883. El número de Reynolds, que compara la importancia de los términos convectivos y los de viscosidad, relaciona densidad, viscosidad, velocidad y una dimensión típica del flujo como.

$$Re = \frac{\rho * v_s * D}{\mu} = \frac{v_s * D}{\nu} \quad [2.4]$$

Donde:

- $\rho \rightarrow$ Densidad.
- $v_s \rightarrow$ Velocidad característica del fluido.
- $D \rightarrow$ Longitud característica del sistema.
- $\mu \rightarrow$ Viscosidad dinámica.
- $\nu \rightarrow$ Viscosidad cinemática.

2.5 Flujo laminar y turbulento.

Se puede definir el flujo laminar como aquel en el que el fluido se mueve en capas o en láminas, deslizándose unas sobre otras de forma suave estratificada y ordenada. Cada partícula de fluido sigue una trayectoria determinada denominada línea de corriente, mientras que en el flujo turbulento, las partículas fluidas se mueven desordenadamente y las trayectorias de estas se encuentra formado pequeños remolinos.

Para determinar si un flujo es turbulento o laminar se utiliza el número de Reynolds:

- Si el Reynolds es muy alto, el flujo tiende a hacerse turbulento.
 $Re > 10^6$
- Si el Reynolds tiene un valor medio, el flujo es una transición entre laminar y turbulento.
 $10^3 \leq Re \leq 10^6$
- Si el Reynolds es muy bajo, el flujo tiende a hacerse laminar.
 $Re < 10^3$

2.6 Capa límite.

La capa límite marca la transición de un flujo dominado por la viscosidad, a un flujo no dominado por la viscosidad en el flujo externo cerca de un cuerpo. Por tanto, se puede definir la capa límite según la influencia de las fuerzas viscosas, con el número de Reynolds.

Para flujos alrededor de cuerpos con un número de Reynolds muy bajo, se habla de un flujo dominado por las fuerzas viscosas, mientras que para un flujo con un Reynolds alto existirá una superposición entre el flujo fuera de la capa límite y el flujo interno de la capa límite.

Para un Reynolds bajo, la región de la capa límite se hace grande, obteniendo una región viscosa muy grande. La región viscosa además de ser más ancha, también se extiende aguas arriba del cuerpo y en la estela. El objeto en estudio frenará mucho la corriente y pequeñas variaciones del flujo originan grandes cambios en la distribución de presiones a lo largo del cuerpo. El flujo en este caso se considera como capas viscosas gruesas que se estudian experimentalmente o con programas de fluidos computacional.

Para un número de Reynolds alto, el flujo en este caso está formado por capas viscosas, tanto laminares como turbulentas, muy delgadas. Dentro de la capa límite existe a su vez una transición entre un flujo laminar y un flujo turbulento.

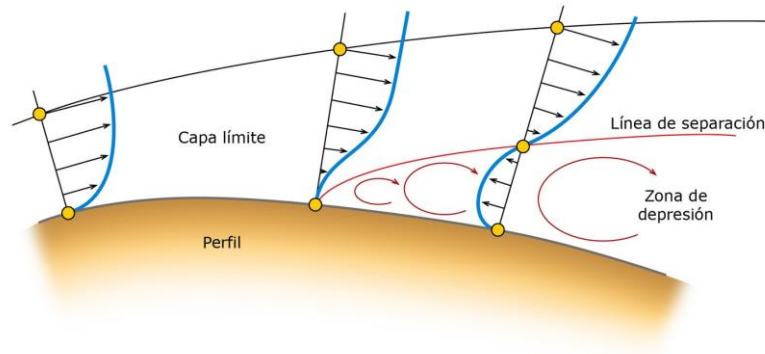


Figura 2.3: Desprendimiento de la capa límite (www.kimerius.com)

La técnica del análisis de capa límite, para flujos con un número de Reynolds alto ($Re \geq 10^3$), permite calcular los efectos viscosos cerca de las paredes sólidas y superponer estos esfuerzos al movimiento exterior no viscoso. El acoplamiento es más efectivo cuanto mayor es el número de Reynolds.

En todos los casos para flujos a altos números de Reynolds, la capa límite es tan delgada que se puede despreciar el efecto del desplazamiento inducido en la corriente no viscosa, de modo que la distribución de presiones a lo largo de la placa se puede determinar a partir de la teoría no viscosa, como si la capa límite no existiese. Esta suposición de que la capa límite y la distribución de presiones de la corriente exterior constituye una aproximación muy buena en cuerpos esbeltos, pero no así en cuerpos romos donde existirá una separación del flujo de la capa límite.



Figura 2.4: Flujo turbulento en una esfera (www.elpais.com)

Este efecto de desprendimiento de la capa límite se produce por una pérdida excesiva de cantidad de movimiento del fluido de la capa límite cerca de la pared, cuando el fluido debe moverse aguas abajo con un gradiente adverso de presión. Estos flujos se tratan mediante tres técnicas:

- Soluciones numéricas mediante mecánica de fluidos computacional.
- Experimentación, apoyada con el análisis dimensional. Es uno de los métodos más corrientes.
- La teoría de la capa límite, formulada por Ludwig Prandtl, que permite simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes e incluso predecir la separación de la capa límite en presencia de gradientes de presión adversos. Esta teoría tiene como contrapartida no poder predecir el comportamiento del flujo en la región desprendida ni su interacción con la región exterior.

Debido a la complejidad de un análisis matemático para el flujo con la teoría de capa límite y el coste computacional, en caso de simulación numérica, se opta por la simplificación de considerar todo el área de nuestro problema como un flujo laminar, con un flujo dominado por la viscosidad.

3 Aerodinámica en motocicletas

3.1 Resistencia aerodinámica.

Ahora vamos a ver porque se produce la resistencia aerodinámica - que después de todo es la que roba más potencia a nuestro motor, a no ser que circulemos a muy baja velocidad. Cuando una motocicleta se mueve con cierta velocidad a través del aire, aparece una fuerza de rozamiento que intenta impedir este movimiento. Esta fuerza se genera debido a que existe una diferencia de presiones entre las partes delantera y trasera de la motocicleta. Esta diferencia de presiones actúa en el área frontal de la moto dando lugar a la fuerza de resistencia aerodinámica, y por este motivo, cuanto mayor es el área frontal de la moto, mayor es la fuerza. No siempre nos paramos a pensarlo, pero la viscosidad del aire es la responsable de esta fuerza de rozamiento. Sin esa viscosidad, cualquier forma, por muy poco aerodinámica que fuera, tendría una resistencia aerodinámica nula a alta velocidad.

De acuerdo con el teorema de Bernoulli, la presión total del flujo de gas que circula alrededor de un cuerpo se compone de dos partes, la primera es la presión estática y la otra es la presión dinámica debida a su velocidad longitudinal. La presión total (la suma de las dos) permanece constante, por lo que tanto si se aumenta la velocidad del gas, su presión dinámica aumenta y su presión estática disminuye. Cuando el aire se encuentra con un objeto móvil, como una motocicleta, comienza a aumentar y a disminuir su velocidad conforme se va encontrando con las distintas formas, y por lo tanto, la presión que se crea en las distintas zonas de la moto y piloto varia de un lugar a otro. Si sumamos todas las componentes individuales de la presión del aire a lo largo de toda la moto, la fuerza resultante abarca tanto la fuerza de resistencia aerodinámica (drag) como la fuerza de sustentación (lift). Si existe una componente perpendicular a la corriente de aire, también existirá una fuerza perpendicular.

Sin embargo, si usamos las leyes clásicas de la física, con lo que llamamos un “gas ideal”, tendremos unos cálculos que no nos proporcionarán ningún tipo de rozamiento. En otras palabras, la fuerza de rozamiento producida por la presión de un gas que actúa sobre a superficie frontal de un objeto estaría compensada de forma exacta por una fuerza de propulsión debida a la presión del gas actuando en la superficie trasera del objeto. Esta ausencia aparente de rozamiento se conoce habitualmente como paradoja de d'Alembert. La experiencia nos dice que realmente si que existe rozamiento, por lo que necesitaremos buscar otros motivos.

Cerca de la superficie de la moto y del piloto, el aire no se comporta como un gas ideal, la viscosidad produce una fricción interna. Justo en la superficie la velocidad del aire es igual a la de la moto y la fricción interna del gas tiende a arrastrar con él a las capas adyacentes de aire. Conforme nos alejamos de la superficie, el aire se ve menos afectado, por lo que podemos deducir que

cerca de la superficie de la moto la velocidad de las partículas es la misma que la del vehículo, y fuera de esta capa, la velocidad de las partículas es la del aire circundante. Esta capa se conoce como capa límite y su comportamiento tiene una gran importancia en las propiedades aerodinámicas del vehículo.

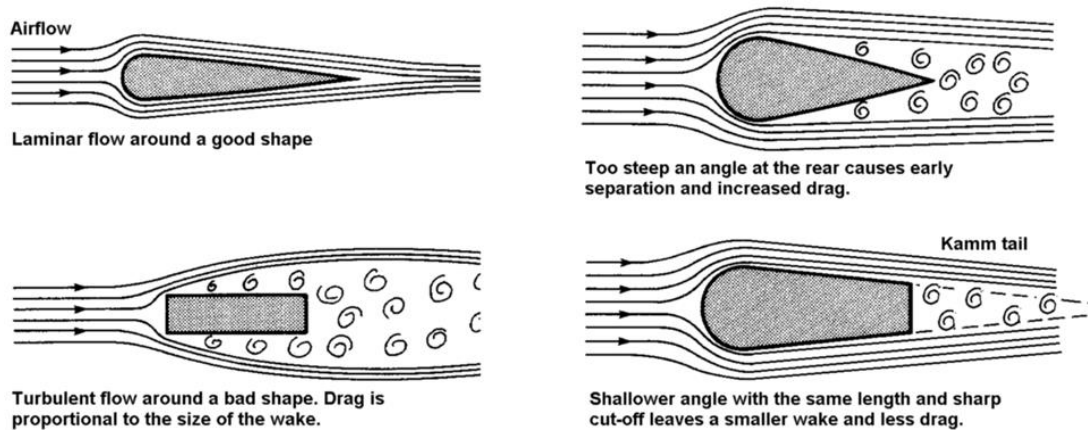


Figura 3.1: Estelas (Tony Foale)

Cuando el flujo de aire local que está alrededor de un cuerpo es lento (ya sea porque el vehículo se mueve lentamente o ya sea debido a la forma del objeto), el gradiente de velocidad es pequeño y las capas adyacentes que están dentro de la capa límite deslizan unas sobre las otras de forma ordenada, esto es lo que se llama flujo laminar. Sin embargo, cuando las velocidades locales son elevadas, el gradiente de velocidad también lo es y el rozamiento entre las distintas capas hace que unas salten sobre las otras (como las olas del mar rompiendo en la costa) creando remolinos. Este tipo de flujo se llama turbulento. A no ser que la velocidad sea muy baja, tendremos una mezcla de flujo laminar y turbulento sobre el vehículo que está en movimiento. Hablando de forma general, los vehículos suelen tener una parte delantera que hace que la única posibilidad que normalmente tiene el aire es la de seguir las formas del objeto hasta llegar a la zona donde está la sección más ancha del vehículo, a partir de este punto la capa límite se hace más gruesa y cuando la forma del cuerpo se aleja mucho de lo que sería ideal, el aire ya no puede seguir pegado al contorno y la capa límite se separa del vehículo. El objeto que se mueve a través del aire deja una estela turbulenta detrás de él. El tamaño, la forma del objeto y su velocidad son los factores que influyen en mayor medida en la forma de esta estela. La presión en el interior de la estela tiende a ser constante y menor que la presión atmosférica, y ciertamente menor también que la presión media que actúa en la superficie frontal del vehículo, esta diferencia de presiones es la que da lugar a la fuerza de resistencia aerodinámica. Numerosos estudios han demostrado que esta fuerza es aproximadamente proporcional al tamaño de la estela.

Así pues, la viscosidad produce un cambio en la distribución de presión alrededor del vehículo y si sumamos las componentes de la presión, tendremos un efecto resultante que da lugar a fuerzas de rozamiento y de

sustentación. Así es como, brevemente explicado, la viscosidad produce la mayor parte de la resistencia aerodinámica. La viscosidad también produce otro efecto más directo, conocido como resistencia viscosa. Para empujar a un cuerpo a través de un fluido viscoso debemos proporcionar una fuerza de cortadura que haga que las capas adyacentes se corten o deslicen unas sobre otras. Esta fuerza también actúa haciendo que el vehículo vaya más lento y por lo tanto este es un efecto que hay que sumar a la fuerza de resistencia aerodinámica previamente descrita. En un vehículo normal de carretera esta resistencia superficial supone solo una pequeña parte de la fuerza de resistencia aerodinámica total.

El punto en el que la capa límite se separa del cuerpo se conoce como punto de separación. Normalmente nos interesa diseñar el carenado de forma que este punto esté lo más retrasado posible, y también que la presión en ese punto sea lo más pequeña posible, para reducir el tamaño de la estela. El aire, al igual que cualquier otra cosa, prefiere no cambiar de dirección de forma rápida y para prevenir la separación debemos evitar reducciones bruscas de la sección transversal conforme nos vamos moviendo hacia atrás, de esta forma llegamos a la típica forma de lagrima, larga y fina, que produce una resistencia aerodinámica muy baja.

De todas formas, la relación entre la longitud y la anchura que se necesita para tener la menor resistencia aerodinámica, nos proporcionaría una motocicleta demasiado larga. Si acortamos el carenado dándole a la parte trasera un ángulo mayor, solo conseguiremos que el aire se separe mas pronto, con lo que tendremos una estela mas grande y una mayor resistencia aerodinámica. Es mejor diseñar un carenado mas largo y después cortarlo por la parte trasera, dejándolo a la longitud que necesitemos, el punto ideal para cortar es el punto de separación. Por detrás de ese punto la forma tiene menos importancia y por lo tanto la ausencia de carenado es menos importante. Esto se conoce como “cola Kamm”, ya que fue el Dr. Kamm quien la invento.

Aún utilizando una “cola Kamm”, es difícil carenar de forma eficiente una moto debido a los diversos cortes que se necesitan por motivos prácticos, como subirse y bajarse de la moto, poder poner un pie en el suelo cuando paramos, etc. Sin embargo se pueden hacer mejoras. Contrariamente a lo que suele ser habitual, el lugar por donde hay que empezar es la parte trasera de la moto, el flujo alrededor de las zonas de alta presión de la parte delantera normalmente se comporta razonablemente bien por si solo, pero cualquier cosa que suavice el flujo en la parte trasera y que ayude a reducir el tamaño de la estela supondrá un beneficio real. De hecho muchos frontales muy afilados producirían menos rozamiento si se les diera la vuelta. Las máquinas diseñadas para conseguir records de velocidad no solo tienen la menor área frontal posible, también tienen un carenado que se extiende mas allá de la rueda trasera.

La fuerza aerodinámica real es proporcional al área frontal del vehículo, por lo que si multiplicamos por dos el área, multiplicamos también por dos la resistencia aerodinámica y la potencia necesaria. Sin embargo, el efecto de la

velocidad en la resistencia aerodinámica sigue una ley cuadrática, esto es, Si duplicamos la velocidad del aire, multiplicamos por cuatro la resistencia aerodinámica. El efecto de la velocidad sobre la potencia es todavía más drástico, es proporcional a la tercera potencia de la velocidad del aire y por lo tanto necesitamos incrementar ocho veces la potencia cuando duplicamos la velocidad.

Para poder comparar numéricamente las cualidades aerodinámicas de objetos de distintas formas, se utiliza un parámetro adimensional llamado Cd. A menudo se deduce incorrectamente que si empujamos una chapa plana a través del aire, su Cd es igual a 1.0. Esto se refiere solamente a un caso teórico especial, cuando todo el aire llega a la chapa rebota contra la misma. Para comparar la resistencia aerodinámica de varios cuerpos necesitaremos multiplicar el Cd por el área frontal, esto se conoce como CdA y sus unidades son las que se hayan utilizado para medir el área. El valor de Cd como parámetro adimensional y el de CdA es:

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} * \rho * v^2 * A}; \quad C_d A = \frac{D}{\frac{1}{2} * \rho * v^2} \quad [3.1, 3.2]$$

Donde los términos de la ecuación son:

- D: fuerza por unidad de longitud
- ρ : densidad del flujo
- v: velocidad del flujo de aire incidente
- A: área característica o área frontal

El tamaño es un tema muy interesante, porque afecta a la validez de la extrapolación a una máquina real de los resultados obtenidos con un modelo a escala. Los túneles de viento que son suficientemente grandes para alojar a una moto o coche de tamaño real, son muy caros de construir y de utilizar, y por lo tanto si podemos utilizar modelos a escala, podremos ahorrar una gran cantidad de dinero. Sin embargo el uso de modelos también plantea sus dificultades. En primer lugar existen problemas bastante evidentes, como la precisión del modelo, por ejemplo una tolerancia de 1mm en el objeto real supone una tolerancia de 0.2 mm en un modelo a escala 1:5.

Modelo de moto	CdA con piloto tumbado	CdA con piloto sentado
Yamaha Venture		0,75
Honda V65 Magna		0,61
Honda Blackbird	0,44/0,49	0,72/0,81
Honda VF 1000F	0,4	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 W1100 RT	0,53	0,97
BMW K1000RS	0,4	0,43
Yamaha R1 (1998)	0,57	0,62
Yamaha FJ1100	0,43	0,48
Suzuki GSX1100EF	0,41	0,44
Kawasaki GPZ900R	0,36	0,43
Kawasaki ZX-12R	0,34	
Yamaha OW69	0,32	
Suzuki GSXR750	0,32	
Suzuki Hayabusa	0,31	
Honda RS500	0,24	
Honda 1996 RS125	0,2	
Honda 1990 RS125	0,19	
Rifle faired Yamaha	0,15	

Tabla 3.1: Coeficiente de arrastre en distintas motocicletas (Tony Foale)

Cuanto más bajo es el valor de CdA, menor será la potencia necesaria para alcanzar una velocidad determinada. Estos datos se han recopilado utilizando diversas fuentes y pueden existir variaciones entre las medidas hechas en distintas instalaciones. Por ejemplo, el tamaño del piloto y su ropa pueden ser diferentes.

Reynolds, uno de los primeros investigadores de dinámica de fluidos, descubrió que las características de la turbulencia de objetos de forma similar y distintos tamaños, dependía de su tamaño y de la velocidad del aire. De hecho, si reducimos a la mitad el tamaño de un objeto, necesitamos duplicar la velocidad del aire para conseguir un flujo de características similares. Este efecto se formalizó en una expresión matemática conocida como número de Reynolds. Para conseguir flujos similares con modelos de diferentes tamaños, tenemos que intentar que este número se mantenga constante, pero en muchos casos es muy difícil. Asumamos que queremos investigar la aerodinámica de una motocicleta que circula a 150 km/h usando un modelo a escala 1:6 en un túnel de viento. Necesitaríamos (para obtener un número de Reynolds similar) que la velocidad en el túnel de viento fuera de unos 900 km/h, lo que automáticamente introduce más problemas. Se necesitaría una potencia tremenda para conseguir esta velocidad del aire, y las fuerzas en el modelo serían extremadamente elevadas, lo que implicaría dificultad en el montaje.

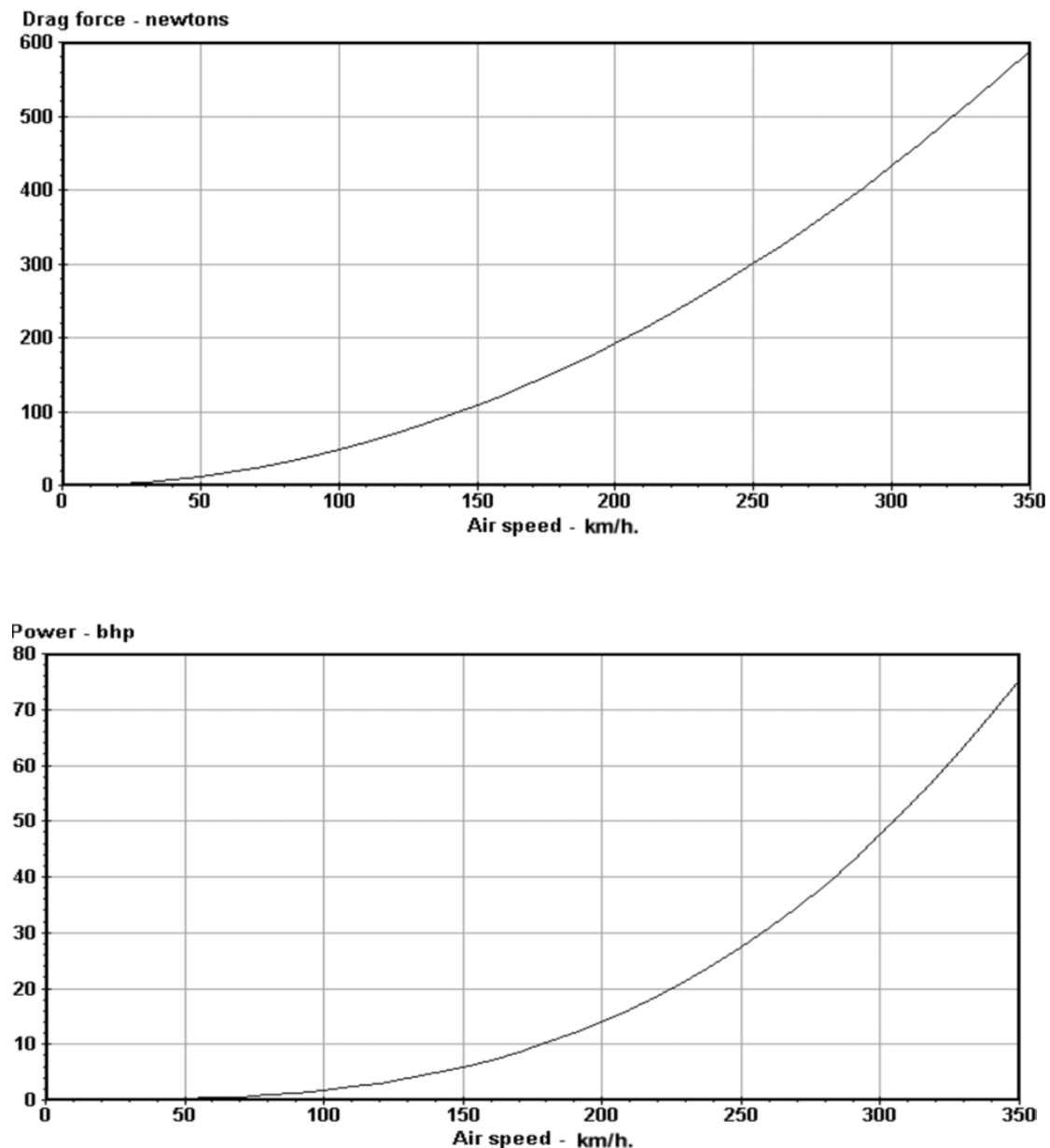


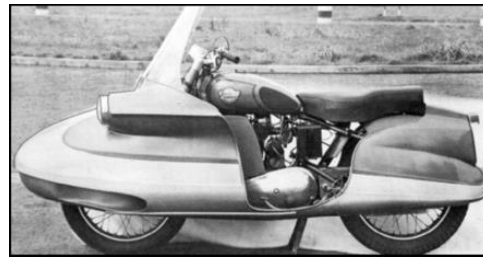
Figura 3.2: Evolución del drag y la potencia con la velocidad (Tony Foale)

Fuerza de resistencia aerodinámica en función de la velocidad del aire. La primera gráfica muestra la resistencia de un objeto con un área frontal de 1000 cm^2 y un $C_d = 1$. La segunda muestra la potencia necesaria en función de la velocidad del aire para un objeto con un área frontal de 1000 cm^2 y un $C_d = 1$.

De hecho, con el mismo número de Reynolds, la fuerza aerodinámica en el modelo sería la misma que la que existiría en el objeto real. Y por si todo esto no fuera lo suficientemente complicado, los 900 km/h están muy cerca de la velocidad del sonido. Conforme nos acercamos a esta velocidad, aparecen problemas de compresibilidad que desestabilizan todas las características del flujo. El resultado final de todo esto es que los ensayos con modelos a escala reducida se deben llevar a cabo con números de Reynolds bajos y es necesario tener mucho cuidado y mucha habilidad para poder interpretar los

resultados de forma correcta. Estas curvas se han dibujado para un área frontal de 1000 cm^2 y un $C_d = 1$. Por lo tanto para obtener la fuerza de resistencia aerodinámica o la potencia necesaria para una motocicleta real, deberíamos multiplicar los valores de la gráfica por el C_d y el área frontal real del vehículo en particular.

En el año 1956, la revista "Motor Cycle" mostró los beneficios de una buena penetración aerodinámica. Le pidieron a Laurie Watts, un artista técnico, que diseñara un carenado muy aerodinámico y semi-cerrado, para cubrir una Royal Enfield de 350 cc y cinco años de antigüedad. Esto dio lugar a un incremento de peso de 20,4 kg, pero debido a las mejoras aerodinámicas incluso se mejoró la aceleración en el rango entre 24 y 64 km/h.



Left: Vic Willoughby testing the Motor Cycle magazine sponsored Royal Enfield "Dreamliner".

Even though its shape appears to owe more to styling than to optimum aerodynamics, its performance figures are impressive. It added an extra 45 lbf. (20.4 kgf.) to the weight but still achieved improved acceleration and reduced fuel consumption: 35% less at 60 mph. (97 km/h.).

Above: Side view showing front and rear fairings.

Figura 3.3: Royal Enfield "Dreamliner" (Tony Foale)

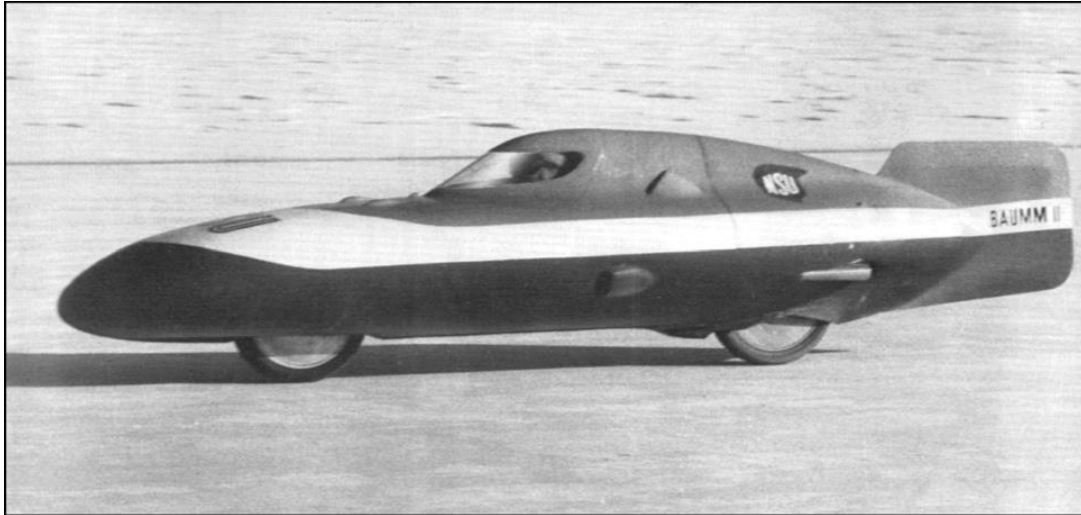
Tratar de conseguir estos resultados mediante una mejora aerodinámica tiene sus problemas, fundamentalmente porque todas las pruebas se llevaron a cabo sin modificar las relaciones de la caja de cambios, por lo que las rpm que alcanzaba el motor y por tanto la potencia que producía eran diferentes durante las pruebas de velocidad máxima, dependiendo de si el carenado estaba o no puesto. La potencia que producía el motor a la máxima velocidad podía haber sido mayor con el carenado puesto.

Table of performance

Nature of test.	Standard machine	With bodywork
Fuel consumption		
30 mph. (48.3 Km/hr.)	102 mpg. (2.77 l/100 Km)	126 mpg. (2.24 l/100Km)
45 mph (72.4 Km/hr.)	83 mpg. (3.42 l/100 Km)	105 mpg. (2.69 l/100 Km)
60 mph (96.6 Km/hr.)	55 mpg. (5.14 l/100 Km)	74 mpg. (3.81 l/100 Km)
70 mph (112.7 Km/hr.)	Couldn't maintain around the track.	60 mpg. (4.71 l/100 Km)
Acceleration		
15 – 40 mph second gear	6.4 secs	5.5 secs
40 – 65 mph top gear	15.7 secs	13.6 secs
Standing ¼ mile (402 m.)	20.3 secs	19.6 secs
Speed at end of ¼ mile	61 mph (98.2 Km/hr.)	64 mph (103 Km/hr.)
Top speed		
Sitting up, with head wind	59.5 mph (95.8 Km/hr.)	66 mph (106.2 Km/hr.)
Sitting up, with tail wind	70 mph (112.7 Km/hr.)	78 mph (125.5 Km/hr.)
Sitting up mean	65 mph (104.6 Km/hr.)	72 mph (115.9 Km/hr.)
Laying down, with head wind	64.5 mph (103.8 Km/hr.)	---
Laying down, with tail wind	78 mph (125.5 Km/hr.)	---
Laying down mean	71.3 mph (114.7 Km/hr.)	---
Coasting		
From 60 mph (97 Km/hr) to 0	388 yards (355 metres)	500 yards (457 metres)

Tabla 3.2: Diferencias de la Royal Enfield sin y con el carenado aerodinámico (Tony Foale)

Desde un punto de vista aerodinámico la clásica forma de lágrima sería difícil de mejorar. NSU, utilizó una aproximación a esta forma para batir varios records del mundo de velocidad en las clases más pequeñas. Existieron planes para usar versiones más cortas de este tipo de carenados en los grandes premios y posteriormente en motos de calle, pero los cambios que la FIM (Federación Internacional de Motociclismo) introdujo en el reglamento en 1957 prohibieron cualquier cosa que no fuera un carenado de lo más rudimentario. Un legado que llega hasta nuestros días.



H.P. (Happy) Mueller streaks across the Utah salt at 240 km/h in the 125 cc NSU "flying hammock" in 1956. Probably one of the most aerodynamic motorcycles built. The tail fin was only fitted for runs above about 240 km/h. (MCW)

This top view of an NSU record breaker shows how close its designer came to a perfect tear-drop shape. Note the long length to width ratio, which allows for a shallow angle toward the rear.



Figura 3.4: NSU "flying hammock" (Tony Foale)

3.2 Evolución de los carenados de competición

Años 50

Esta Norton Kneeler de 1953, se usó para batir el record de la hora, dejándolo en 256 Km en el circuito de Montlhery con Ray Amm a los mandos. Esta prueba consiste en hacer la mayor distancia posible en una hora.



Figura 3.5: Norton Kneeler, 1953 (Tony Foale)

La NSU Rennmax de 1954. Es un ascendiente directo de las líneas aerodinámicas que se utilizan hoy en día, donde se puede observar el carenado frontal muy parecido a algunas motos actuales.

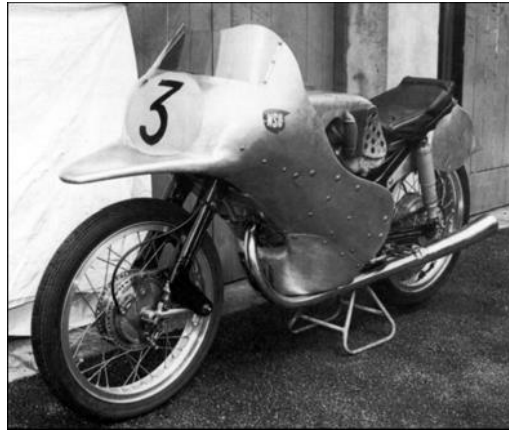


Figura 3.6: NSU Rennmax, 1954 (Tony Foale)

Se puede observar un tipo de carenado frontal muy popular en todas las categorías en los años 50. Sin embargo carenar la parte trasera no era tan habitual, generalmente sólo se utilizaban en las motos de 125 cc, que necesitaban toda la ayuda que se les pudiera proporcionar. Para los rivales era más difícil coger rebufo porque la estela era menor.



Figura 3.7: Motocicleta 125 cc, años 50 (Tony Foale)

En los años 50, Moto Guzzi tenía su propio túnel de viento a escala real. Las motos diseñadas fueron probablemente las que tuvieron los carenados tipo “dustbin” (cubo de basura) más aerodinámicos de aquella época. En la figura se puede observar una monocilíndrica de 500 cc en el TT, con Deith Campbell a los mandos. Esta motocicleta tenía una gran eficiencia aerodinámica, ya que con solo 47 CV lograba alcanzar los 240 km/h de velocidad máxima.



Figura 3.8: Guzzi 500 cc (Tony Foale)

Años 60

Después del año 1957, la FIM (Fédération Internationale de Motocyclisme) prohibió algunos tipos de carenados, rápidamente la forma de “delfín” pasó a ser la forma predominante a finales de los 50 y principios de los 60. En la figura se observa a Bob McIntyre sobre una Honda 250 en el TT de 1961, muestra las formas básicas que se han mantenido hasta nuestros días.

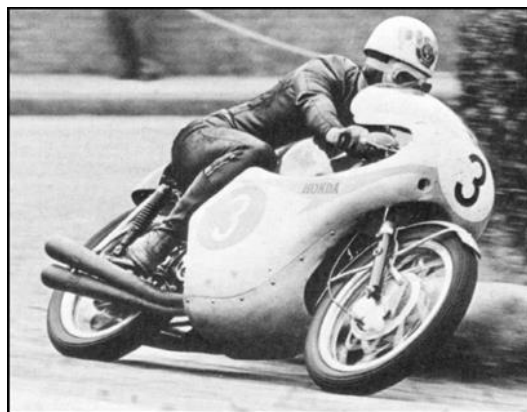


Figura 3.9: Honda 250 cc, 1961 (Tony Foale)

Años 70

En esta década vuelven a tomar importancia el tamaño del colín para reducir la estela. Se muestra dos fotos de una Monark creada en 1975.

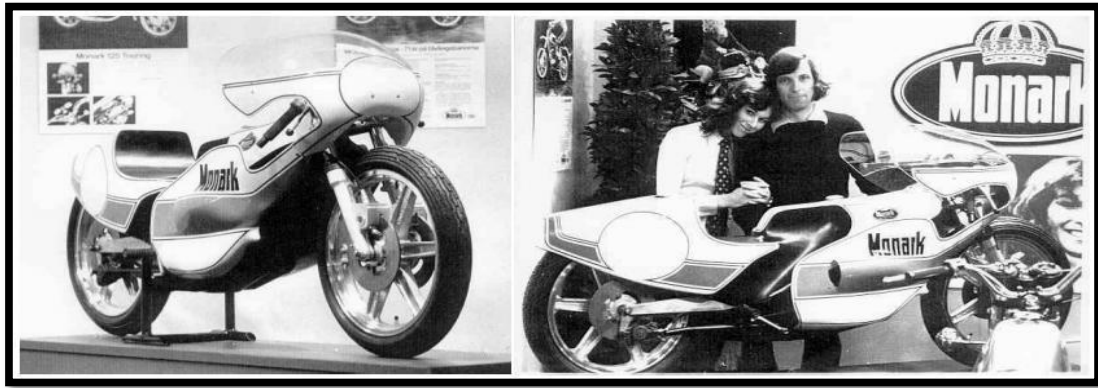


Figura 3.10: Monark, 1975

En la siguiente imagen, se muestra la importancia que llegó a tomar el colín, incluso más que los laterales que cubren el motor.



Figura 3.11: Importancia del colín en algunas motos

Años 80

Los carenados de los años 80 se asemejan mucho a lo que se pueden ver hoy en día. Las pequeñas diferencias más destacadas son que la cúpula frontal era algo más grande y redonda y que los colines son más grandes y acaban en un corte estilo cola Kamm.



Figura 3.12: Motos de competición de los 80

Aquí se pueden ver dos motos Rotax de 125cc de competición. Llama la atención el tamaño tan reducido del colín.



Figura 3.13: Rotax 125 cc (Tony Foale)

Años 90 hasta hoy

Los últimos 20 años la carrocería de las motos de competición no ha variado mucho. Todas se basan en la misma forma básica, sobre todo por las limitaciones que imponen las propias competiciones. A continuación se muestran diferentes modelos en función del año para poder diferenciar las pequeñas variaciones a lo largo de los últimos años.

- Año 90. Las cúpulas dejan de ser tan redondeadas y los colines comienzan a tener una caída mayor.



Figura 3.14: Yamaha YZR500/ Derby GPR 125 cc/ Honda 125 cc

- Año 94. Los carenados laterales comienzan a reducirse al igual que el tamaño del colín.



Figura 3.15: Yamaha YZR500, 1994/ Honda 250 cc/ Honda RS 125 cc

- Año 97. Los carenados tienden a hacerse más finos para reducir el área frontal, la cúpula tiene una caída más pronunciada y se tiende a acortar el carenado, incluido el colín.



Figura 3.17: Honda NSR500/ Aprilia RS 125 cc/ Honda RS 125 cc

- Año 2000. Las motocicletas tienden una forma muy parecida a la actual. La única evolución apreciable es la reducción del colín en la parte inferior, mientras en la superior se tiende a continuar lo más fielmente posible la caída de la espalda del piloto.



Figura 3.18: Yamaha YZR500/ Aprilia RS 125 cc/ Honda RS 125 cc

- Año 2004. Se reduce aun más el tamaño del colín y empiezan a verse los primeros difusores. La Honda RS 125cc alcanza una forma que no cambia hasta hoy en día.



Figura 3.19: Honda y Yamaha MotoGP/ Aprilia RS 125 cc/ Honda RS 125 cc

- Año 2009. Durante los últimos años, gracias al avance de la técnica de CFD, se estudia con más detenimiento la zona frontal de la motocicleta, concretamente la zona de máxima presión. En esta zona se obtiene el flujo para el Airbox o caja de aire con el fin de obtener una presión mayor en la admisión del ciclo.



Figura 3.20: Honda MotoGP/ Yamaha MotoGP

- Año 2014. La aerodinámica de los últimos 7 años no ha variado prácticamente nada. Las motos de gran cilindrada han sufrido alguna variación más, pero sin ninguna importancia considerable.



Figura 3.21: Honda MotoGP/ Yamaha MotoGP/ Colín Ducati Desmosicicchi MotoGP

Lo que se puede diferenciar de esta generación a la anterior, es que la quilla (la parte inferior) es más estrecha y llena casi por completo el espacio que hay entre ambas ruedas. Se observa también como el guardabarros delantero cubre las barras de la horquilla. Por último, lo que más ha podido llegar a variar estos últimos años es la parte trasera (el colín), que se ha alargado y elevado para ayudar a suavizar el flujo que pasa por la espalda del piloto, además de la optimización del flujo y la derivación de un escape por esta zona para reducir el coeficiente de arrastre.

3.3 Flujo de aire interno

Las necesidades del motor también complican el asunto, y los requerimientos actuales incrementan inevitablemente la resistencia aerodinámica. Cualquier moto necesita un suministro de aire fresco para poder respirar de forma eficiente, y para refrigerar el motor. Aprovechando las altas presiones que existen en el morro de la moto se han llevado a cabo muchos intentos para presurizar levemente el aire que llega al sistema de admisión, con la intención de conseguir una sobrecarga a altas velocidades. Antiguamente, los problemas de carburación hacían que resultara complicado explotar esta idea adecuadamente, pero con los sistemas de inyección actuales es más sencillo conseguirlo. Una técnica alternativa consiste en encerrar completamente los carburadores en el interior de una gran caja, a la que le llega aire fresco a través de unos tubos que provienen del morro de la moto. A las velocidades a las que se circula normalmente por la carretera el beneficio potencial de la sobrecarga es muy pequeño, se necesitan velocidades muy elevadas para

que comience a ser significativo. A 160 km/h el beneficio máximo que se puede conseguir es del 1% y tendríamos que viajar a unos 320 km/h para conseguir un incremento de potencia del 5%. Esto podría añadir unos 5 km/h más a la velocidad máxima de 320 km/h, y sólo 0.5 km/h a 160 km/h. De todas formas, estamos asumiendo que podemos utilizar el máximo potencial, en la práctica diversas pérdidas de carga en los conductos impiden que podamos conseguir esas cifras. Generalmente el beneficio principal de estos sistemas es que nos aseguramos que llega aire fiasco al sistema de admisión del motor.

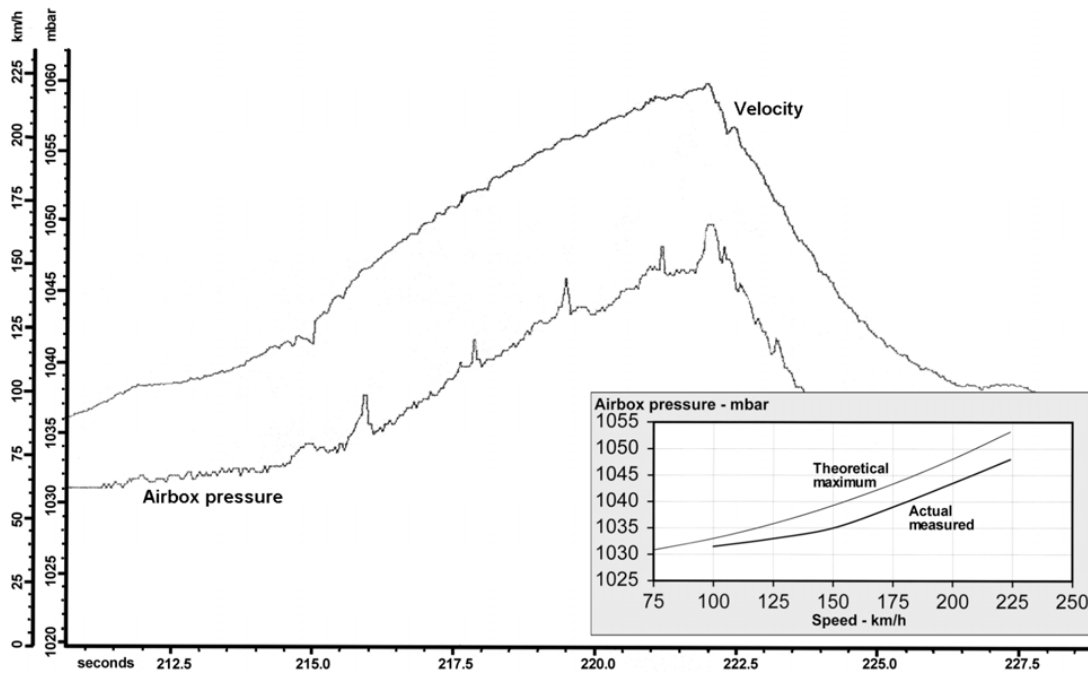


Figura 3.22: Velocidad y presión en el airbox con el tiempo (Tony Foale)

La figura muestra una medición de la presión real existente en el airbox de una motocicleta 250 cc. GP. Podemos ver cómo aumenta la presión en el airbox conforme aumenta la velocidad. Los picos en la curva de presión ocurren cuando se corta gas durante un corto espacio de tiempo para cambiar de marcha. En ese instante el motor no está absorbiendo aire del airbox y la presión aumenta hasta que llega a la máxima presión disponible en el conducto.

Tanto si el motor está refrigerado por aire o por agua, debemos proporcionarle un flujo de aire fresco. Los motores refrigerados por aire no nos permiten elegir a dónde debemos dirigir el aire, mientras que en los motores refrigerados por agua, el radiador se puede montar en diversas posiciones para adaptarnos al espacio disponible y también en función de consideraciones aerodinámicas. La posición frontal es la más obvia y la más común, pero el paso del aire queda restringido por la horquilla. Se han buscado orientaciones alternativas, como:

- Honda NR500 con radiadores laterales



Figura 3.23: Honda NR500

- Britten, con el radiador colocado debajo del sillín.



Figura 3.24: Britten V1000, 1995

3.4 Sustentación

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). Esta 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 delante 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 de la dirección que tenga. Además de las fuerzas que actúan en el CdP, la distribución de presión puede dar lugar a momentos. Por ejemplo, si tenemos una fuerza de sustentación positiva (que apunta hacia arriba) en la parte delantera y otra negativa (que apunta hacia abajo) en la parte trasera, la fuerza vertical resultante será igual a cero, pero existirá un momento que

intentará que la moto rote hacia atrás. Estos momentos son conocidos como momentos aerodinámicos. Normalmente, además de visualizar las fuerzas y los momentos que actúan en un punto, resulta muy útil considerar la relación que existe entre ese punto y la posición del CdG. Estas fuerzas crean momentos alrededor del CdG que pueden tener un gran impacto en la estabilidad dinámica. La sustentación aerodinámica descrita anteriormente reduce la carga total sobre los neumáticos, por lo que es potencialmente peligrosa porque reduce la máxima adherencia que puede llegar a existir entre los neumáticos y la carretera.

Si el CdP de la sustentación está por delante del CdG, la fuerza de sustentación causará una gran reducción de la carga del neumático delantero comparada con la del trasero, y viceversa. No siempre nos damos cuenta, pero incluso utilizando un carenado con una forma tal que no produjera fuerza de sustentación (sólo fuerza de resistencia aerodinámica), ni tampoco cualquier momento de cabeceo, todavía existiría una tendencia para que se transfiriera carga de la rueda delantera a la trasera, esta tendencia se debería enteramente al efecto de la fuerza aerodinámica, tal y como muestra la siguiente figura.



Fig 5.6 In the case shown, the resultant aerodynamic force is acting upward. The horizontal component is the drag force and the vertical component represents a lift force.

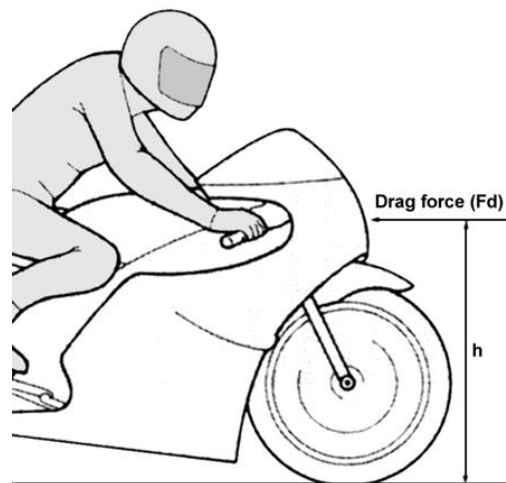


Fig 5.7 The drag force F_d acts at height h to create a moment $F_d \cdot h$ tending to unload the front wheel and load the rear.

Figura 3.25: Transferencia de carga (Tony Foale)

La fuerza aerodinámica F_d , actúa a través del CdP frontal, a una distancia h del suelo. Esto produce un momento que intenta rotar la moto hacia atrás, descargando la rueda delantera y cargando la trasera. Es fácil ponerle valores a este efecto para tener una idea de su importancia relativa.

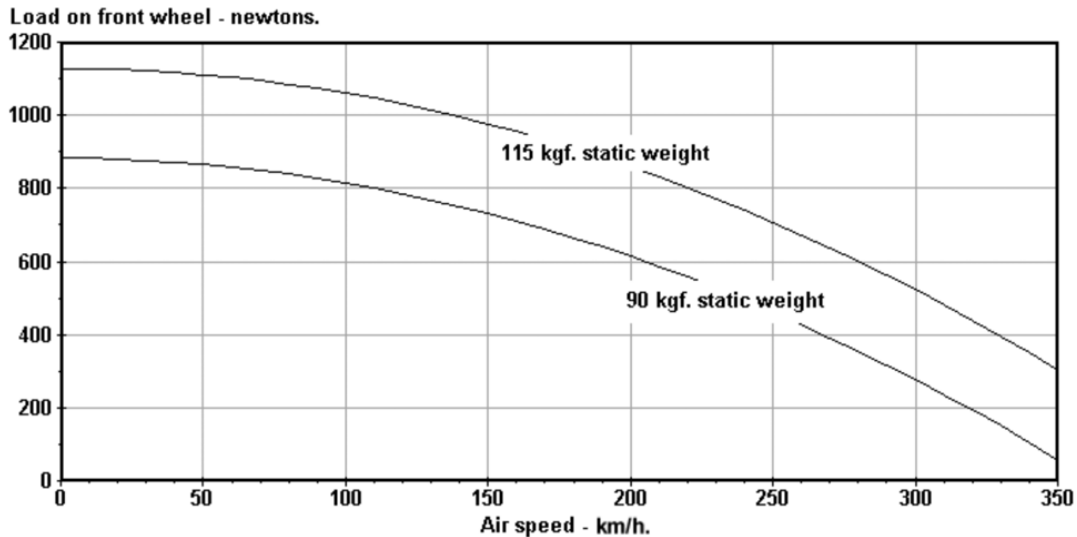
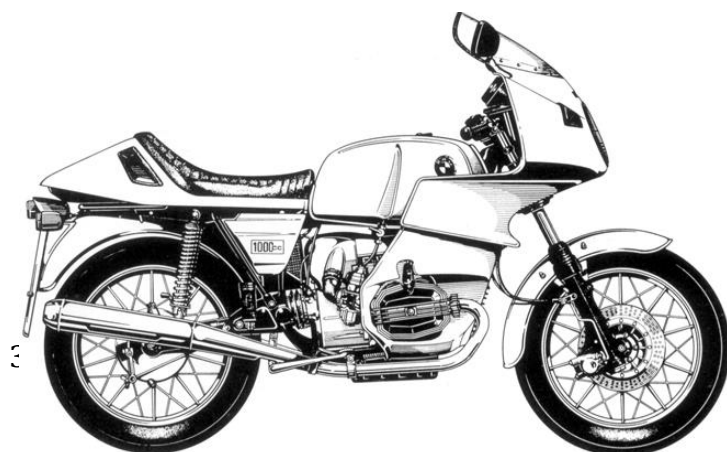


Figura 3.26: Variación de la carga en la rueda frontal al variar la velocidad del aire (Tony Foale)

La figura nos muestra que la transferencia de carga puede llegar a ser muy importante a partir de 130 km/h. La gráfica representa una motocicleta ficticia con un área frontal de 4000 cm^2 y un $C_d = 0.7$, una distancia entre ejes de 1500 mm y CdP situado a una altura de 750 mm. Podemos ver dos curvas, una que asume que la motocicleta en parado tiene una carga de 115 kgf sobre su rueda delantera y la otra que tiene 90 kgf. A 200 km/h la carga de la rueda delantera se reduce en 270 N. Y la carga en la trasera se incrementa en 270 N, obviamente esta cantidad es significativa y tendrá un efecto en el comportamiento y en la capacidad de la moto para tomar las curvas. Este ejemplo representa a una moto de competición (no muy alta por lo tanto) y por este motivo es conservador en cuanto a la transferencia de carga se refiere.

Manteniendo el resto de cosas iguales, cualquier cosa que reduzca la resistencia aerodinámica y/o la altura efectiva a la que actúa, ayudará a reducir la transferencia de carga. Además de reducir la resistencia aerodinámica, la situación ideal sería utilizar un carenado con una forma tal que creara una fuerza abajo (fuerza de sustentación negativa) en la parte delantera y una fuerza de sustentación positiva en la parte trasera, para equilibrar de forma exacta el efecto que acabamos de mencionar.

Originalmente fueron BMW con su R100 RS y más tarde Suzuki con algunas motos de competición, los que comenzaron a preocuparse por eliminar la sustentación. Hoy en día este problema ya recibe una mayor atención por parte de los fabricantes.



BMW no sólo fue la primera en incorporar un carenado como elemento estándar, también dedicó un esfuerzo

por: José Ángel Moya Muriana

considerable para reducir la pérdida de carga en la rueda delantera debido a la fuerza de sustentación. Podemos ver la superficie plana inclinada hacia atrás en la zona de encima de las manos y también la aleta lateral que comienza justo detrás de la parte superior de la rueda delantera.

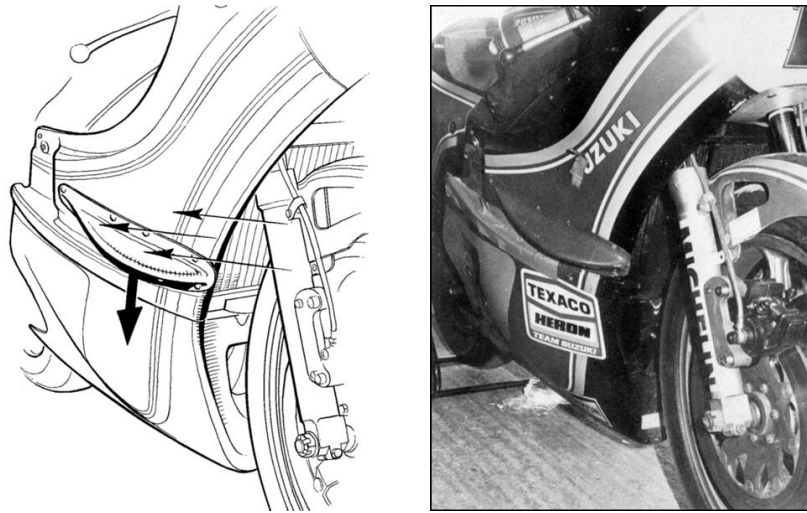


Figura 3.27: Carenados con sustentación negativa (Tony Foale)

Debemos recordar que este efecto de sustentación producido por la fuerza aerodinámica no es el único efecto aerodinámico que varía la carga de los neumáticos. A este efecto debemos añadir cualquier sustentación global, que reducirá la carga en ambas ruedas y cualquier momento aerodinámico de cabeceo que puede tender a cargar una rueda y descargar la otra.

Dado que los automóviles de competición consiguen un incremento brutal de su velocidad de paso por curva gracias al agarre extra que consiguen en sus neumáticos debido a las cargas aerodinámicas que, a través de los alerones delanteros y traseros, pegan el coche al suelo, además del “efecto suelo” del chasis, podríamos pensar que se podría explotar el mismo principio en una motocicleta. Pero debido a que las motos necesitan inclinarse para tomar las curvas, la situación es más compleja que en un coche. De hecho, un alerón fijo u otros medios que se pudieran utilizar para generar una carga aerodinámica, probablemente reducirían la velocidad de paso por curva.

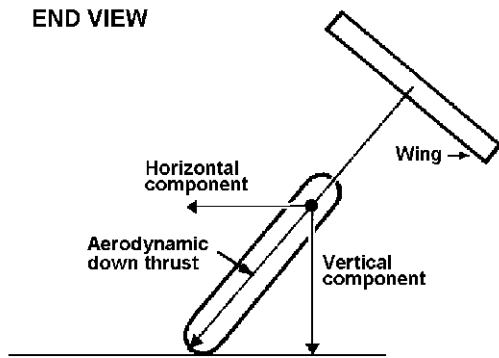


Fig 5.10 A fixed wing across the bike just increases the horizontal and vertical components acting on the tyres in the same proportion and hence there is no nett gain in cornering performance. Probably the reverse.

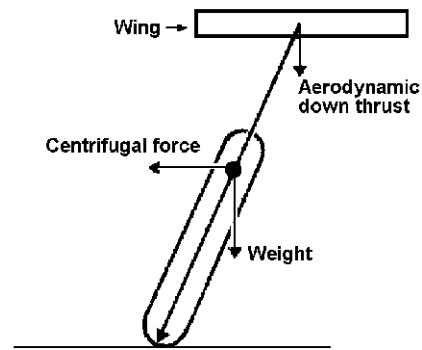


Fig 5.11 In theory, a tilting wing that remained horizontal could enhance braking, traction and cornering power. As a side effect, a smaller angle of lean would be required for a given cornering speed.

Figura 3.28: Efectos de un alerón sobre una motocicleta (Tony Foale)

La figura representa una moto tumbada, y muestra que la fuerza hacia abajo producida por un alerón actúa alineada con la moto y tiene dos componentes, una vertical y otra horizontal.

Aunque la componente vertical se puede utilizar para incrementar la adherencia en la huella de contacto de los neumáticos, esta adherencia extra sólo contrarresta la componente horizontal añadida, y por lo tanto finalmente no existe ningún beneficio. La adherencia disponible en el neumático depende también de la presión en la huella de contacto, de forma que la carga extra en el neumático debida al alerón reduciría el coeficiente de rozamiento. Así, la adherencia disponible para generar la fuerza centrípeta se reduciría, por lo que la velocidad máxima de paso por curva sería menor.



Colin Lyster with his "wing" designed for a 450 Honda racer. The angle of attack was to be adjusted by fore and aft movement of the rider in the hope of better braking with the added downforce and extra drag.

However, the drag of this high mounted wing would create a backward moment which would reduce the vertical load on the front wheel.

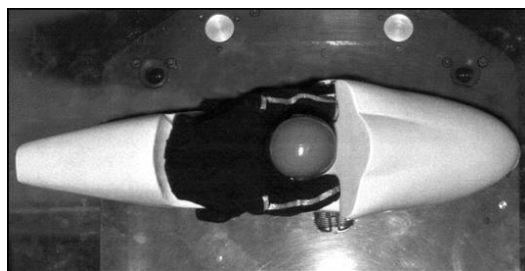
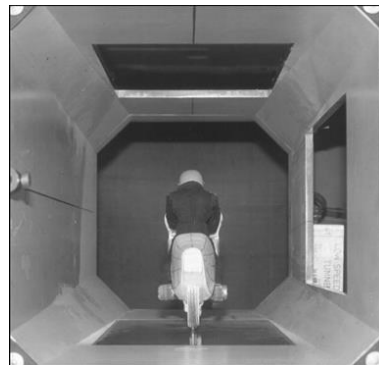
Other disadvantages would include: greater roll moments due to side winds and even with a light-weight wing structure its high position would increase the roll moment of inertia quite considerably, any lateral flexibility in the mountings would most likely result in some form of weave instability.

The dynamics of motorcycles are very different from the dynamics of cars and not all "improvements" from the car world are applicable for motorcycle use. (MCN)

Figura 3.29: Colin Lyster con un prototipo de alerón para motocicletas (Tony Foale)

Sin embargo, realmente la fuerza de sustentación aerodinámica puede llegar a incrementar la velocidad de paso por curva - en detrimento de la frenada a alta velocidad, de la tracción y de la estabilidad. Llevando el asunto a un extremo ridículo, una motocicleta se convertiría en un aeroplano, que puede girar hasta llegar a unas aceleraciones laterales que están limitadas tan sólo por la capacidad que tenga la estructura para soportar las fuerzas que se generen. Si pudiéramos generar una carga aerodinámica que actuara únicamente en sentido vertical y hacia abajo (por ejemplo, mediante un alerón abatible) se conseguiría aumentar la velocidad en frenadas, aceleración y al tomar las curvas (al igual que en un coche). Un interesante efecto secundario es que haría falta un ángulo de inclinación menor para tomar una curva determinada a una velocidad determinada.

El momento debido a la carga aerodinámica ayuda a contrarrestar el momento de la fuerza centrífuga. Así, el momento debido al peso de la moto se reduce - lo que implica un menor ángulo de inclinación. De todas formas, cualquier beneficio proveniente de un dispositivo de este tipo, podría verse superado por problemas de tipo práctico y de estabilidad. En línea recta, cualquier carga aerodinámica cargaría más los neumáticos y por lo tanto tendríamos más capacidad de tracción. Si tuviéramos unos frenos lo suficientemente buenos, y un motor lo suficientemente potente, esta mayor adherencia nos permitiría poder frenar y acelerar mejor.



Whilst ultimate aerodynamic efficiency was not the prime goal of the author's QL, it was desired to improve upon a standard machine within the bounds of practicality. The photos above right and lower left show a 1/6 scale model in a wind-tunnel. Measurements from this model were compared with a 1/6 scale model of a standard R90s BMW. This comparison indicated that the QL had 65% of the drag of the standard bike. Whilst the low Reynold's numbers may have caused relative differences in the separation points it was clear that drag was significantly lower. Road tests later confirmed this as well as excellent weather protection and stability.

Figura 3.30: Modelo a escala de un prototipo en un túnel de viento (Tony Foale)

The mid 1980s Ducati Paso featured this almost totally enclosing bodywork, with internal ducting. As a road bike the rider would be expected to have a sight line above the windshield which, like the author's QL, was not transparent.



The NSU record breaker being tested in the full size wind tunnel at the Stuttgart Technical College. The size of such installations is quite apparent from this photograph. Compare this to the much smaller tunnel used by the author to test the 1/6th scale model of the QL, pictured earlier.

Figura 3.31: NSU bate records en el túnel de viento del Colegio Técnico de Stuttgart (Tony Foale)

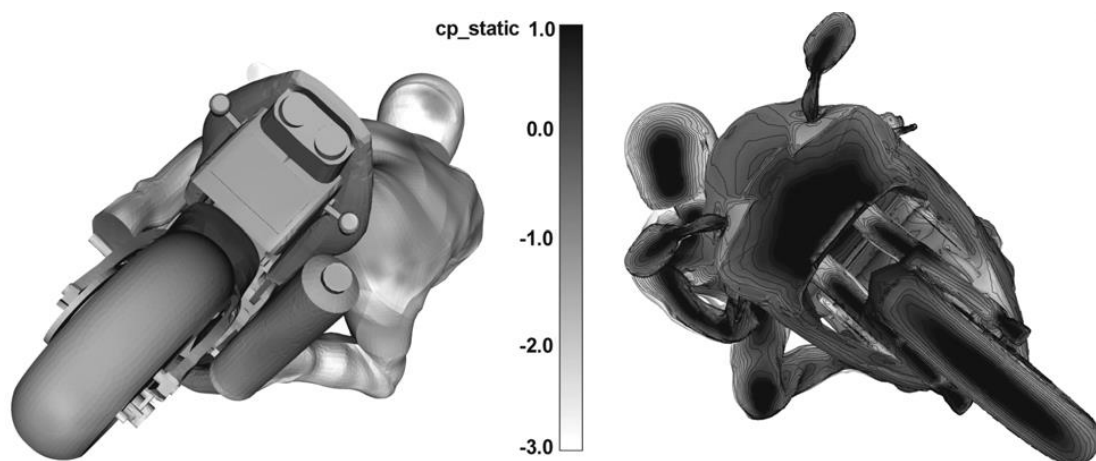
3.5 Evaluación de prestaciones

Tradicionalmente, las mediciones de las prestaciones aerodinámicas reales de vehículos se han llevado a cabo en el túnel de viento, pero este tipo de pruebas son muy caras. Hemos visto también algunos de los problemas que acarrea utilizar modelos a escala reducida en túneles más pequeños, bien sea por las tolerancias del modelo, bien por la dificultad de conseguir números de Reynolds similares. No existe un sustituto para los túneles que trabajan con modelos de tamaño real y velocidades de viento reales, pero este tipo de instalaciones son muy grandes y muy caras de construir. Se necesita una potencia muy considerable para hacer girar los ventiladores. Lleva mucho tiempo depurar la forma del vehículo. Se hace una prueba, se modifica el modelo según hayan indicado las pruebas, se vuelve a repetir el ciclo de prueba/modificación, así muchas veces. Sin embargo, con la

aparición de ordenadores cada vez más pequeños y potentes, llega una nueva alternativa, el CFD (Dinámica Computacional de Fluidos). Con el CFD el aire que está alrededor del vehículo se divide en un gran número de pequeñas celdas y después se calcula la presión, la velocidad y la turbulencia de cada celda, pero teniendo en cuenta que esas variables deben estar en equilibrio entre una celda y la siguiente, a través de los límites de cada celda. El problema es que es necesario modificar millones de celdas para modelizar el flujo incluso alrededor de una forma simple. Así, los ordenadores se utilizan para:

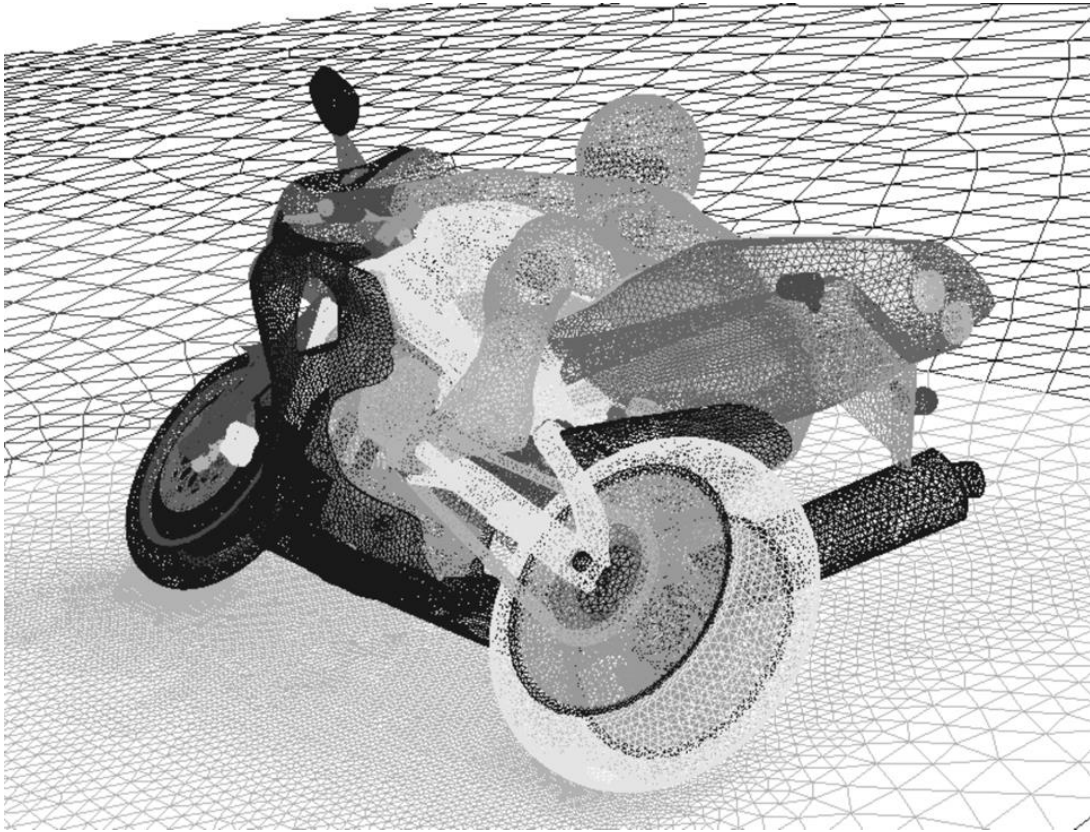
- Crear y definir las numerosas celdas, con dibujos de CAD o digitalizando con un escáner láser.
- Relacionar las propiedades de todas las celdas mediante un conjunto de ecuaciones no lineales.
- Resolver los millones de ecuaciones de forma simultánea.
- El ordenador crea una serie de gráficos que se usan para presentar los numerosos valores de forma que sean fáciles de digerir para un humano.

Estas técnicas prometen grandes reducciones de costo y tiempos de desarrollo cortos. No es necesario construir modelos físicos, los modelos se definen directamente con los dibujos de CAD del vehículo. Es posible iterar con relativa rapidez con un amplio rango de diseños alternativos, porque sólo se necesita modificar las pocas superficies del dibujo, y volver a repetir después los cálculos con el ordenador.



CFD plots of the pressure distribution on bike and rider. The shading indicates the static pressure, as per the central scale. Such plots are normally in colour which highlights the differences much better than these grey scale images. The right hand sketch is also marked up with iso-bars, or lines of constant pressure. (Advantage CFD, Reynard Motorsport Ltd)

Figura 3.32: Análisis CFD de una moto y su piloto (Tony Foale)



A 2D representation of the CFD grid of cells around the bike and rider. In reality the cells are 3D and fill the whole volume around the machine, literally millions of cells are necessary to model the flow successfully. (Advantage CFD, Reynard Motorsport Ltd)

Figura 3.33: Mallado para simulaciones de una moto y su piloto (Tony Foale)

3.6 Estabilidad con viento lateral

La mayoría de los textos sobre aerodinámica para motocicletas siguen los criterios de estabilidad de vehículos que no se inclinan y los de los aviones que vuelan a baja velocidad, sin embargo estos planteamientos desprecian acoplamientos del tipo guiñada-inclinación-dirección, efectos de gran importancia e inherentes a las motos. Vamos a echar un vistazo a estas explicaciones tradicionales y después veremos en qué difiere una motocicleta real:

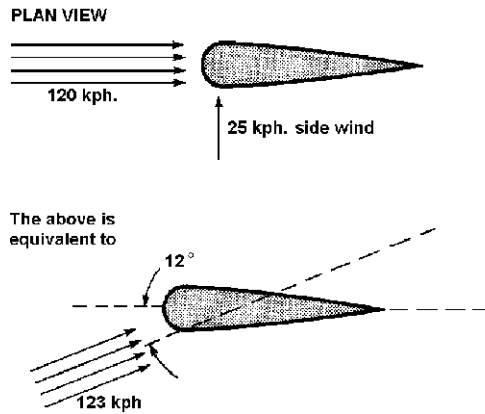


Fig 5.12 Adding the effects of the forward speed of 120 km/h and the side wind of 25 km/h results in a total equivalent air flow of 123 km/h acting at an angle of about 12 degrees.

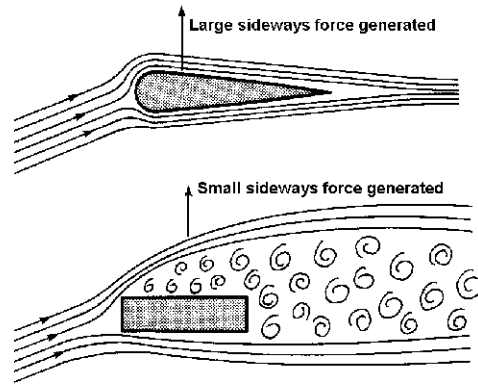


Fig 5.13 Shows how a well streamlined shape such as an aircraft's wing produces a side or lift force, whereas the brick shaped object is less affected by the inclined air stream.

Figura 3.34: Estelas con viento lateral (Tony Foale)

A menudo se dice que la estabilidad aerodinámica se consigue de forma automática si el CdP está a una distancia adecuada por detrás del CdG. Si no es este el caso, el piloto debe aplicar una corrección mediante la dirección. Este es el mismo criterio de estabilidad que hace que los aviones necesiten tener aletas verticales detrás, y que los dardos y las flechas necesiten plumas. Si el CdP está atrasado, el viento empuja la parte trasera de la moto, de forma que el morro queda apuntando hacia el viento y así se corrige automáticamente la tendencia a salirse de la trayectoria elegida.

Por otro lado, cuando el CdP está adelantado, el viento empuja la parte delantera y la máquina gira apartándose de su trayectoria original, una condición básicamente inestable.

En realidad, a la hora de la verdad no resulta tan sencillo conseguir que el CdP quede en la parte trasera de la moto. En las motocicletas convencionales casi todo (sino todo) el carenado queda por delante del piloto. Esto es en parte una consecuencia de la decisión, un tanto corta de miras, que la FIM tomó en 1957 restringiendo severamente el diseño de los carenados de las motos de carreras, y por lo tanto en un diseño normal resulta inevitable que el CdP esté adelantado.

Irónicamente, aún disponiendo de un carenado diseñado a propósito para que tuviera una gran área lateral en la zona trasera, seguiría siendo muy difícil conseguir el efecto deseado. Para entender por qué, necesitamos estudiar con un poco más de detenimiento cómo se comporta el flujo de aire alrededor de una moto. La figura anterior nos muestra cómo con la velocidad, el viento lateral no se comporta sólo como un viento lateral, sino que se combina con la corriente de aire longitudinal que crea el propio movimiento de la moto, creando un flujo de aire que forma un cierto ángulo con la máquina. Por ejemplo, si la moto se mueve a 120 km/h con un viento lateral de 25 km/h, la corriente de aire efectiva será de 123 km/h y actuará con un ángulo de 12°.

Una sección que sea muy aerodinámica, como el ala de un avión, producirá fuerzas muy grandes con tales ángulos de incidencia. En las alas de los aviones esas fuerzas actúan elevándolas, y su magnitud se demuestra de forma muy eficaz cada vez que despegue un 747. En un vehículo terrestre, esas fuerzas actúan lateralmente, y sería conveniente reducir su magnitud si queremos minimizar las distorsiones que producen. Una motocicleta real está en algún lugar entre la forma de lágrima ideal (para conseguir una buena aerodinámica) y un ladrillo con ruedas. El flujo de aire que circula alrededor del área frontal de la motocicleta estará bastante bien ordenado, pero en algún punto a lo largo de la longitud de la moto llegará a separarse, pasando a ser turbulento por detrás de ese punto. Cuando ocurre esto, el área que queda expuesta a este flujo turbulento no resulta útil para conseguir que el CdP quede en la parte trasera. Conforme la velocidad es mayor, el punto de separación tiende a moverse de delante a atrás y por lo tanto el CdP también se mueve así. Las máquinas “caza records” suelen tener a menudo grandes aletas de cola, para intentar contrarrestar este efecto.

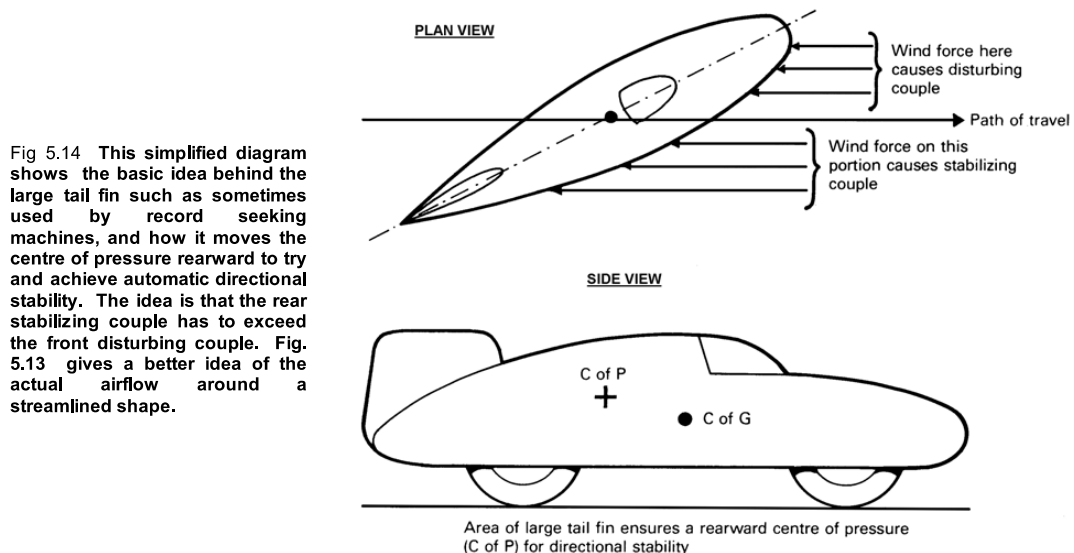


Figura 3.35: Posición del centro de presiones bajo viento lateral (Tony Foale)

Supongamos que, por cualquier razón, la moto adopta una posición de guiñada (esto es, que la moto forma cierto ángulo con respecto a la dirección de viaje) a alta velocidad, cuando las fuerzas aerodinámicas son significativas. El momento lineal de la moto hace que ésta tienda a seguir moviéndose en la dirección que llevaba, a pesar de su posición de guiñada, de forma que la fuerza del viento que crea su movimiento actúa en la parte delantera de su costado. La presión del aire en esa zona que está por delante del CdG da lugar a un momento que ayuda a la distorsión, mientras que si la presión estuviera por detrás del CdG, la moto tendería a corregir su posición. Dependiendo de las posiciones relativas del CdG y del CdP, uno de estos dos efectos opuestos será el predominante.

Esta explicación suele ser muy habitual, y es muy acertada en el caso de los aviones y vehículos de más de dos ruedas, sin embargo, necesita unos cambios para poder adaptarse a las peculiaridades de los vehículos de dos ruedas.

Fig 5.15 The weight acting through the CoG at a distance x from the tyre contact produces a counter balancing torque to cancel that from the side force acting at height h . More weight and a high CoG reduce the lean angle needed to maintain balance.

The lean angle is defined by :

$\theta = \arctan(F_w \cdot h / W_t \cdot x)$ where F_w is the wind force,

W_t is the weight and θ is the lean angle.

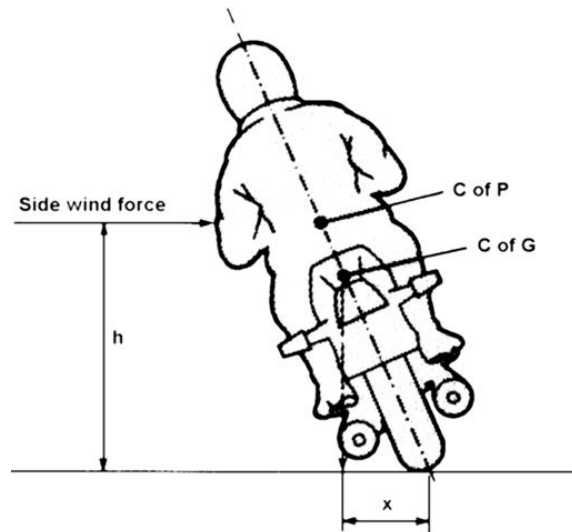


Figura 3.36: Repercusiones del viento lateral en curva (Tony Foale)

Vamos a considerar ahora algunas de las realidades sobre cómo el sistema de dirección de una motocicleta controla las reacciones que produce una fuerza lateral.

3.7 Estabilidad direccional en estado de equilibrio

Con estado de equilibrio nos referimos al caso en el que una moto viaja con un viento lateral uniforme, que crea una fuerza lateral constante que actúa a través del centro de presión lateral. Obviamente, esto causa un momento de inclinación, que debemos equilibrar inclinándonos contra el viento. Para minimizar el ángulo de inclinación necesario para equilibrar una fuerza lateral determinada, necesitamos tener un CdP bajo, un CdG elevado y un peso elevado también. Para impedir que el viento lateral vaya apartando gradualmente a la moto de su trayectoria, debemos girar la dirección hacia el viento.

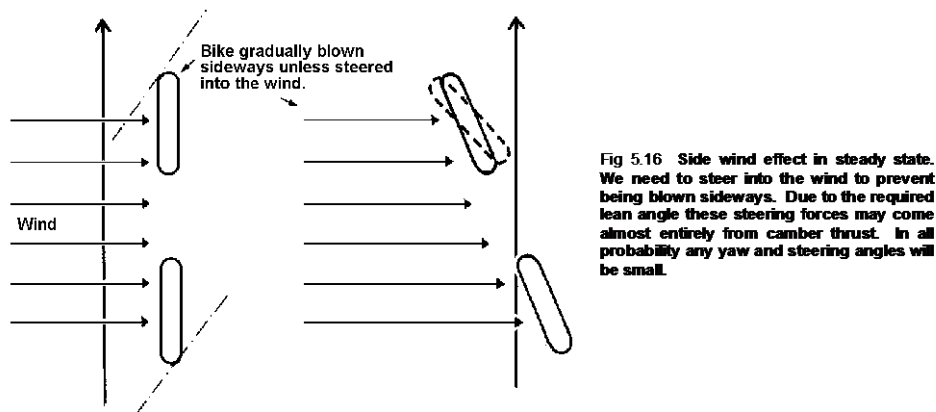


Figura 3.37: Efectos del viento lateral en la estabilidad (Tony Foale)

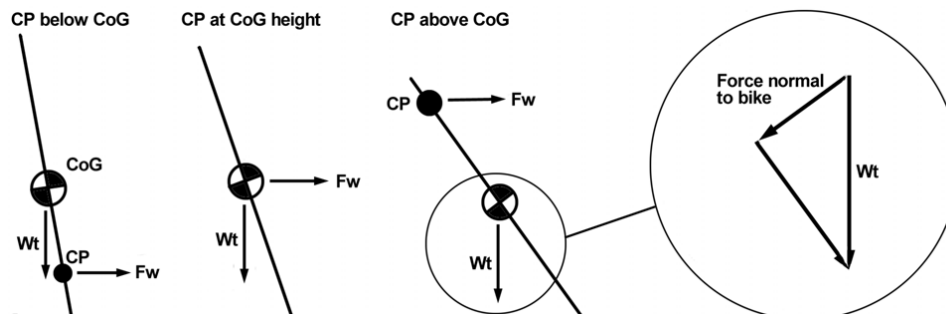


Fig. 5.18 With a given side wind force (F_w) and weight (W_t) the angle of lean is less when the CP is below the CoG. As the lean angle increases the component of the weight acting at right angles to the bike also increases but the normal component of the wind force will decrease. When the CP and CoG are at the same height these normal forces balance.

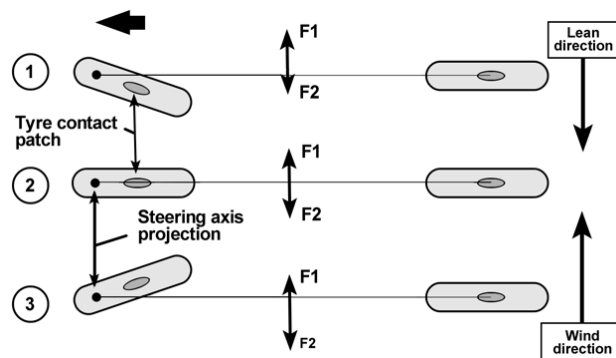


Fig. 5.19 Looking down on the bike's centre plane we can see how unbalanced normal forces cause a steering action. F_1 is the normal component of the wind force and F_2 is the normal weight force.

The projection of the steering axis to the ground is forward of the front tyre contact patch (trail) and so any lateral imbalance in the forces will tend to twist the steering about the contact patch as shown. When F_2 is greater than F_1 , i.e. the CP is higher than the CoG, as in (3) it will steer into the lean. With a low CP (1) the steering will be away from the lean. When the forces F_1 & F_2 are equal (2) there is no steering effect.

Figura 3.38: Momentos y fuerzas derivados del viento lateral (Tony Foale)

La figura anterior muestra cómo cualquier desequilibrio de estas fuerzas normales causará un efecto sobre la dirección. Básicamente, en vez de las fuerzas laterales, lo que debemos equilibrar son los momentos de guiñada. Algunos cálculos muy simples nos muestran que para que no exista ninguna acción sobre la dirección, el punto de aplicación de la fuerza lateral debe estar sobre una línea que vaya desde la huella de contacto del neumático hasta el CdG, tal y como se muestra en la siguiente figura.

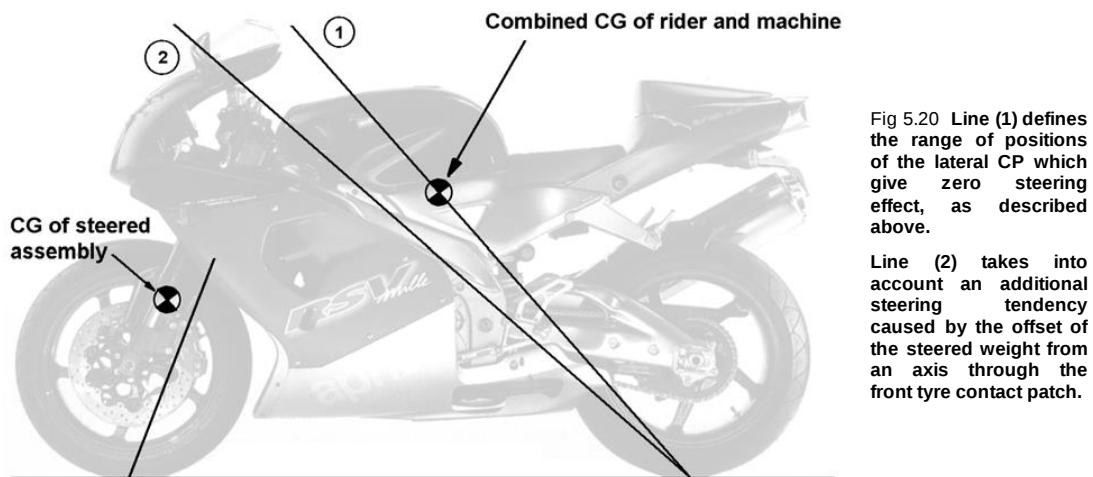


Figura 3.39: Líneas de estabilidad (Tony Foale)

La explicación anterior solo tiene en cuenta uno de los dos efectos que el viento lateral produce sobre la dirección. El segundo se origina en el conjunto de piezas que forman el sistema de dirección. Normalmente el CdG de este conjunto está descentrado hacia delante con respecto al eje que pasa por la huella de contacto del neumático, no vamos a entrar en detalles aquí, excepto decir que la línea neutral de la dirección queda un poco más adelantada, lo podemos ver en la línea 2 de la figura anterior. A no ser que la rueda delantera esté cubierta por el carenado, también existirá otro CdP distinto, formado por los componentes de la dirección y que en muchos casos también introducirá momentos adicionales en la dirección. No vamos a considerar este efecto en esta explicación para no complicar más las cosas, pero debemos ser conscientes de su existencia.

Si el CdP está sobre esta línea neutral de la dirección, la motocicleta adoptará una posición estable sin que exista ningún momento adicional sobre la dirección, la podríamos conducir sin manos en presencia de un viento lateral constante. En otras palabras, es autoestable. Si el CdP está en cualquier otro lado, el piloto deberá aplicar un momento continuo sobre la dirección para mantener la trayectoria adecuada. Así pues, está claro que los requerimientos necesarios para obtener una estabilidad aerodinámica pura (CdP atrasado) no son los mismos que aquellos que proporcionan una estabilidad total a la moto. Aunque podemos asegurar una estabilidad automática colocando el CdP sobre la línea neutral de la dirección, las reacciones serán diferentes dependiendo de la posición en que lo pongamos. Hemos visto que el ángulo de inclinación depende de las alturas relativas entre el CdG y el CdP y no de su localización longitudinal. De esta forma, un CdP alto y adelantado puede proporcionar estabilidad pero el ángulo de inclinación será mucho mayor que si el CdP está colocado bajo y más retrasado, siempre sobre la línea neutra de la dirección.

Probablemente podríamos mejorar la estabilidad si pudiéramos elevar el CdP o bajar esa línea, y para conseguirlo debemos reducir la altura del CdG y/o moverlo hacia atrás. Si bajamos el CdG, el ángulo de inclinación tendrá que

ser mayor, lo que no es deseable, por lo que la otra alternativa consiste en adelantarlo. Probablemente estaremos en lo cierto si decimos que en el rango de posiciones prácticas del CdP, la estabilidad ante un viento lateral constante mejorará si colocamos el CdG lo más adelantado posible.

Bajo un viento constante, una carencia de estabilidad automática no supone un gran problema porque el piloto sólo tiene que aplicar un momento corrector constante a la dirección para mantener la trayectoria deseada. Esto nos lleva a hablar tanto de controlabilidad como de estabilidad, las dos son muy diferentes. Dependiendo de si el CdP queda por detrás o por delante de la línea neutra de la dirección, el vehículo girará de forma natural hacia el viento o en contra del viento, cada caso requiere una respuesta de control distinta por parte del piloto. Si la moto gira alejándose del lado de donde viene el viento, el piloto tendrá que girar hacia el viento, y viceversa. Probablemente el piloto sólo llevaría a cabo de forma intuitiva una de estas dos acciones de control. Afortunadamente quizás, en la práctica, el CdP queda por delante de la línea neutral de la dirección, y en contra de la explicación tradicional esto hace que la moto gire hacia el viento. Una reacción natural más estabilizadora. Tal y como veremos, la controlabilidad es más importante en condiciones dinámicas (viento variable).

Sea o no sea estable, los neumáticos tienen que producir fuerzas laterales que se opongan a la del viento, pero la inclinación produce empuje de comba, esto es, una fuerza lateral en los neumáticos que actúa en dirección opuesta a la fuerza del viento. Ahora, si en el momento en el que la moto está inclinada, el ángulo necesario para mantener el equilibrio del empuje de comba que se genera en ambos extremos de la moto es exactamente igual a la fuerza del viento, no hará falta ningún giro adicional de la dirección para mantener la trayectoria deseada. En la mayoría de los casos sólo se necesita girar la dirección un ángulo muy pequeño, a veces nulo, para completar el déficit o el exceso de empuje de comba. En el caso de la inclinación inducida por el viento, podemos aplicar el mismo principio.

Asumiendo que ambos neumáticos tienen la misma rigidez de comba, y que el empuje de comba total de ambos es igual a la fuerza del viento, si el CdP está por delante del CdG, la componente de la fuerza lateral que actúa sobre el neumático delantero será mayor que el empuje de comba delantero y necesitaremos girar la dirección hacia el viento para crear una fuerza adicional en el neumático por medio de un ángulo de deriva. Además, el empuje de comba trasero será ahora mayor que la parte trasera de la fuerza del viento lateral y por lo tanto la parte trasera de la moto girará (guiñada) hacia el viento. Sorprendentemente, esta reacción es necesaria en la parte trasera, ya que conforme la moto hace el movimiento de guiñada, se crea un ángulo de deriva negativo y aparece una fuerza en la dirección para contrarrestar el exceso de empuje de comba. Así que ahora tenemos a la moto en una posición un tanto extraña, con la parte trasera apuntando hacia el viento y la delantera también girada hacia él. Si el CdP está por detrás del CdG la moto adoptará una postura contraria. De todas formas, no es probable que estos ángulos de guiñada y de giro de la dirección sean muy grandes.

Cuando el CdP está sobre la línea neutra de la dirección, la rueda delantera gira automáticamente para corregir el ángulo de deriva de manera similar a lo que hemos descrito arriba para el caso de la rueda trasera. La condición de la línea neutra de la dirección, sólo equilibra los momentos de la dirección, el ángulo de la misma es libre de ajustarse de acuerdo a las fuerzas de los neumáticos, y como todas las fuerzas que se aplican se deben equilibrar, el ángulo de la dirección se ajusta automáticamente para proporcionar la combinación correcta de empuje de comba y fuerza debida al ángulo de deriva. La rigidez de comba y de deriva de los neumáticos tiene de esta forma un gran efecto sobre la posición de guiñada y el ángulo de giro de la dirección que la moto adopta en cualquier condición dada de viento estable.

3.8 Estabilidad direccional dinámica

Con estado dinámico nos referimos a la conducción con viento racheado, del estilo a cuando pasamos por zonas valladas o cuando adelantamos un camión grande. Pasar de repente de una zona sin viento a otra con viento estable también se considera una condición transitoria. El caso de viento estable que acabamos de analizar, básicamente nos suponía que teníamos que establecer un ángulo de inclinación para contrarrestar el momento de inclinación que producía la fuerza estable del viento, y también teníamos que aplicar un momento a la dirección para equilibrar la fuerza lateral, en función de las propiedades de los neumáticos y de la relación entre el CdP lateral y la línea neutra de la dirección. En el caso dinámico existen otros muchos factores a considerar. Las reacciones son extremadamente complejas y todavía no se llegan a comprender del todo, aquí sólo podemos dar un repaso por encima a los puntos más importantes.

La respuesta de una moto ante un viento racheado dependerá de varios aspectos muy importantes:

- El diseño aerodinámico, la magnitud y el punto de aplicación de la carga lateral variable.
- La frecuencia de las rachas.
- La relación entre las posiciones del CdG y el CdP. Esto controla la estabilidad aerodinámica básica, del mismo modo que dice la explicación tradicional, y también afecta a los momentos transitorios de inclinación y guiñada.
- La relación entre el CdP y la línea neutra de la dirección, que controla los momentos que el viento crea en la dirección según la explicación de la estabilidad estática.
- Las respuestas del piloto.
- La distribución de masa y los momentos de inercia alrededor de los ejes principales.

También existen otras influencias, como la rigidez estructural de la moto y las características del neumático.

Como ya se ha apuntado en capítulos anteriores, el movimiento de inclinación de una moto está acoplado con los movimientos de guiñada y de la dirección. Cualquier movimiento rápido de inclinación tiene su efecto en la dirección (a través del avance y de la precisión giroscópica). Así, es importante que el cambio transitorio de inclinación sea lo más pequeño posible, para conseguirlo hace falta un centro de presión bajo y/o un momento de inercia elevado.

Resulta muy complicado visualizar mentalmente el comportamiento de un sistema dinámico complejo, sin hacer ensayos y/o análisis matemáticos. El interés que puede tener hacer un análisis de este tipo es bastante limitado, porque en condiciones dinámicas, la relación entre la fuerza lateral del viento y la posición del CdP varía de una forma muy compleja.

3.9 Resumen

El diseño aerodinámico de motocicletas va más allá de producir un carenado que tenga poca resistencia aerodinámica, poca sustentación y un CdP que esté por detrás del CdG. Resulta complicado conseguir una buena estabilidad con un carenado aerodinámicamente bueno, sobre todo porque suelen tener un área lateral bastante grande y porque se produce más fácilmente cierta “sustentación lateral” debido al ángulo que existe entre la dirección del viento y la dirección de viaje. Por lo tanto, idealmente necesitamos una combinación de requisitos que a veces resultan contradictorios:

- Resistencia aerodinámica mínima para tener unas buenas prestaciones y un bajo consumo de combustible.
- Un CdP frontal bajo para reducir la transferencia de carga debida a las fuerzas aerodinámicas.
- Un CdP lateral situado bajo y atrasado que reduzca los momentos de desequilibrio, y que proporcione estabilidad direccional.
- Un área lateral con una forma y un valor tales que minimicen la fuerza lateral que se produzca.
- Un CdG elevado combinado con un peso grande y un elevado momento de inercia de inclinación, para minimizar el efecto de cualquier fuerza lateral que tenga lugar.



Figura 3.40: Honda Gold Wing (Kerry Dunlop)

4. Fabricación

En este apartado anteriormente comentado en la parte I se detalla la fabricación del modelo a escala, empleando para tal fin, diferentes técnicas de fabricación como son el mecanizado, termoconformado e impresión 3D).

Los pasos que rigen el proceso de fabricación son:

- Diseño completo de la geometría en 3D de la moto a modelar, con la posterior aplicación de un factor de escala de 1:5,5 para el modelo.
- Diseño del proceso de mecanizado de dos moldes simétricos, para fabricar por termoconformado la parte delantera del carenado.
- Operación de mecanizado y lijado de los moldes.
- Puesta a punto de los moldes y operación de termoconformado.
- Impresión 3D del resto de la motocicleta.
- Ensamblaje y pegado de todas las piezas
- Pintado del modelo y fabricación de una base para poder introducirlo en el túnel de viento.

5 Ensayos en el túnel de viento

5.3 Velocimetría de imágenes de partículas (PIV)

La técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas, conocida como PIV (Particle Image Velocimetry) permite determinar el campo instantáneo de velocidades en un plano del fluido. Con este propósito se insertan unas partículas trazadoras en el flujo, que son arrastradas por el mismo, adquiriendo la velocidad del flujo.

Un láser, generalmente pulsado, y la óptica apropiada, permiten formar una delgada lámina de luz que atraviesa el flujo, iluminando las partículas contenidas en él. Las partículas dispersan la luz del láser indicando su posición dentro del flujo, la cual puede ser registrada por un sensor CCD o película fotográfica (plano imagen).

Si el láser es pulsado dos veces con un intervalo de tiempo conocido, registraremos dos posiciones de cada partícula, conociendo así el desplazamiento sufrido por dicha partícula durante ese intervalo de tiempo. Posteriormente se deduce la velocidad de las partículas (del fluido) como el cociente del desplazamiento y el intervalo de tiempo. Un esquema típico de PIV se muestra en la figura 5.26.

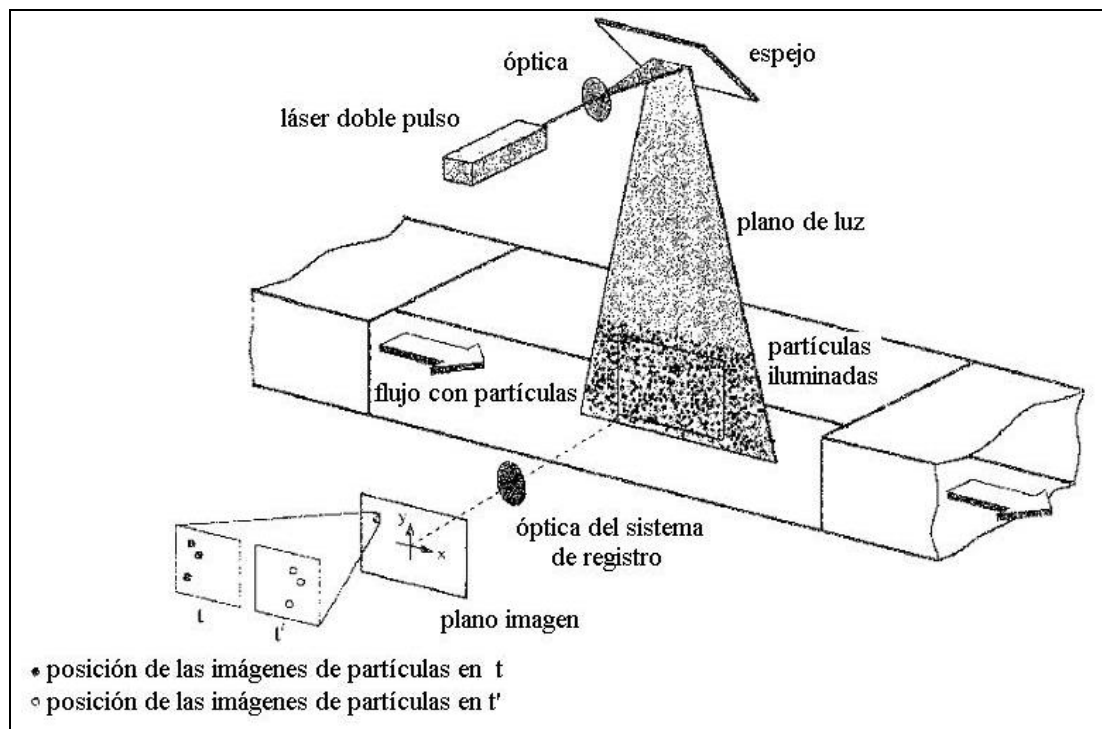


Figura 5.26: Esquema de funcionamiento del PIV (Rafael Bardera)

Desde su aparición, la técnica PIV ha progresado enormemente, debido a diversos avances tecnológicos. Así la capacidad de los ordenadores ha permitido desarrollar equipos con una capacidad y velocidad de procesamiento mucho mayores, lo que unido a la aparición de sensores CCD con una resolución cada vez mayor, ha contribuido a la sustitución del antiguo método de registro en película fotográfica por el registro con cámara CCD conocido habitualmente como video-PIV. Los sistemas actuales de video-PIV tienen una resolución cercana al sistema fotográfico, ofreciendo la posibilidad de la adquisición rápida de una mayor cantidad de imágenes que pueden ser verificadas en el momento (on line), eliminando además el siempre inconveniente proceso de revelado fotográfico. No hay que olvidar los avances en sistemas láser, pues han ido apareciendo sistemas más compactos y de mayor potencia, aumentando prestaciones y reduciendo su precio.

5.3.1 Principios del PIV

La Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) se basa en la medida de la velocidad de las partículas trazadoras transportadas por el fluido. Para ello se ilumina el plano a investigar mediante una lámina de luz láser, de forma que las partículas son visualizadas y su imagen puede ser registrada. Los registros de las imágenes de partículas en dos instantes t y t' , separados un intervalo de tiempo Δt permiten determinar el desplazamiento $\Delta \vec{X}$ de las partículas. Así pues, el principio básico es muy simple:

La velocidad instantánea $\vec{u}(\vec{X}, t)$ de un fluido es una medida del desplazamiento de las partículas trazadoras iluminadas por la lámina de luz, lo cual se puede expresar como,

$$\vec{u}(\vec{X}, t) = \frac{\Delta \vec{X}(\vec{X}, t)}{\Delta t} \quad (\text{Adrian, 1991}) \quad [5.17]$$

La propia naturaleza de la técnica ha dado lugar a que sea calificada como una técnica de visualización cuantitativa, puesto que permite la visualización del flujo a la vez que la realización de medidas cuantitativas de velocidad.

5.3.2 Aspectos de la técnica PIV

Aunque la idea de la medida de velocidad mediante PIV es muy sencilla, su realización práctica no lo es tanto, pues hay muchos aspectos implicados que han debido ir siendo solucionados hasta conseguir una técnica con el estado actual de desarrollo. Los aspectos más importantes de la técnica PIV son los siguientes,

- Partículas trazadoras.
- Sistema de iluminación.
- Sistema de registro.
- Proceso de análisis de imágenes.
- Post-procesado de las medidas.

La figura 3.2 muestra los distintos pasos o fases a seguir para obtener la velocidad de un flujo mediante la técnica PIV.

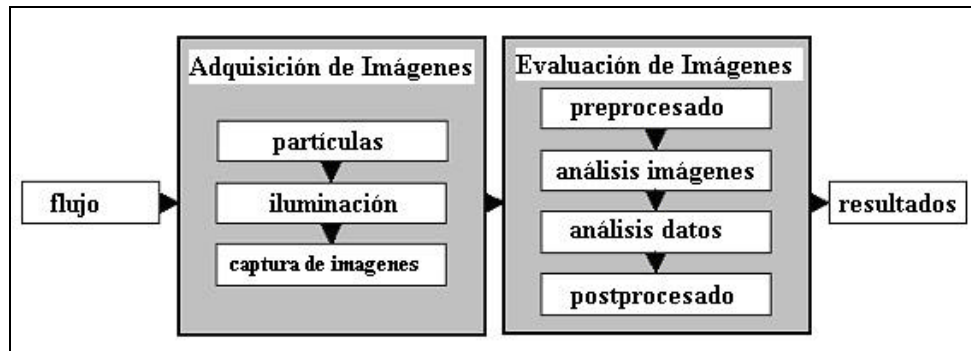


Figura 5.27: Fases para la medida de velocidad con el PIV (Rafael Bardera)

Partículas trazadoras

Las partículas trazadoras insertadas en el flujo deben seguir adecuadamente el mismo, para que su velocidad represente la del flujo. Además, su posición debe poder ser registrada fácilmente cuando son iluminadas. Por ambas razones los requerimientos para las partículas a emplear son:

- Deben seguir adecuadamente el flujo.
- Deben dispersar suficiente luz para poder ser registradas.
- Cantidad de partículas adecuada para obtener buenos resultados de análisis.

El primer requerimiento está relacionado con la densidad del material que constituye la partícula y de su tamaño. En cambio el segundo, no sólo depende de la propia partícula sino que está relacionado también con la potencia del láser empleado y con la sensibilidad del sistema de registro. El último requerimiento es resultado de la experiencia y de diversas simulaciones realizadas para obtener éxito en la evaluación de imágenes PIV.

Movimiento de las partículas

1. La diferencia entre la densidad de las partículas ρ_p y la del fluido ρ_f provoca una velocidad de sedimentación v_s en dirección de la gravedad. El movimiento de partículas pequeñas (diámetro $d_p \sim 1 \mu m$) se encuentra dentro del régimen en que es aplicable la ley de Stokes ($Re < 1$) para la fuerza de resistencia de una esfera en un fluido, de forma que en tal caso, la velocidad de sedimentación vendrá dada por,

$$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f) * g * d_p^2}{18 * \mu_f} \quad [5.18]$$

donde g es la aceleración de la gravedad y μ_f el coeficiente de viscosidad del fluido. Este efecto de sedimentación puede ser minimizado seleccionando partículas de densidad similar a la del fluido, lo cual es relativamente sencillo cuando el fluido es agua, pero muy difícil cuando el fluido es aire.

2. El movimiento de las partículas en la dirección del flujo puede evaluarse de forma aproximada mediante la ecuación,

$$\frac{du_p}{dt} = K * (u_f - u_p) \quad (\text{Merzkirch, 1987}) \quad [5.19]$$

donde u_f y u_p son las velocidades del fluido y de la partícula respectivamente y K es una constante que depende de parámetros característicos de las partículas y del fluido,

$$\frac{18 * \mu_f}{d_p^2 * \rho_f} * \frac{\rho_f}{\rho_p} \quad [5.20]$$

Integrando la ecuación [5.19] con la condición inicial de que las partículas están en reposo, tendremos:

$$u_p = u_f * (1 - e^{-Kt}) \quad [5.21]$$

La ecuación [5.21] expresa que una partícula insertada en el flujo con velocidad nula (reposo) adquiere la velocidad de aquél de forma exponencial.

En algunas ocasiones en lugar de K se utiliza un tiempo de relajación τ_s que es precisamente su inverso, de forma que la expresión [5.21] puede ponerse como,

$$u_p = u_f * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_s}}\right) \quad (\text{Hinsch, 1993}) \quad [5.22]$$

donde el tiempo de relajación vendrá dado por,

$$\tau_s = \frac{d_p^2 * \rho_f}{18 * \mu_f} \quad [5.23]$$

Ese tiempo de relajación representa un tiempo para el cual la partícula ha alcanzado el 63% de la velocidad del fluido. Por consiguiente este tiempo de relajación será tanto menor cuanto menores sean el diámetro y la densidad de las partículas utilizadas.

Óptica de las partículas

Para el estudio de dispersión de luz por pequeñas partículas suele definirse el diámetro normalizado $q = \pi d_p / \lambda$ (Hinsch, 1993). Cuando $q \ll 1$ se sigue la teoría de Rayleigh, mientras que cuando $q \gg 1$ se sigue la ley geométrica.

La técnica PIV se encuentra en el rango intermedio ($q \sim 1$) y la dispersión de luz por partículas esféricas de diámetro $d_p \sim \lambda$ sigue la teoría de Mie, cuyo diagrama de dispersión aparece en la figura 5.28 (escala logarítmica). La flecha indica la dirección de procedencia de la luz, y según puede observarse en dicho diagrama la mayor parte de la luz es dispersada hacia delante, lo cual es una desventaja para PIV, pues la configuración habitual del equipo es tal que el registro se realiza a 90° respecto a la dirección incidente de la luz del láser, y en esta dirección la intensidad dispersada se reduce muchísimo, lo cual implica la necesidad de utilizar láseres más potentes.

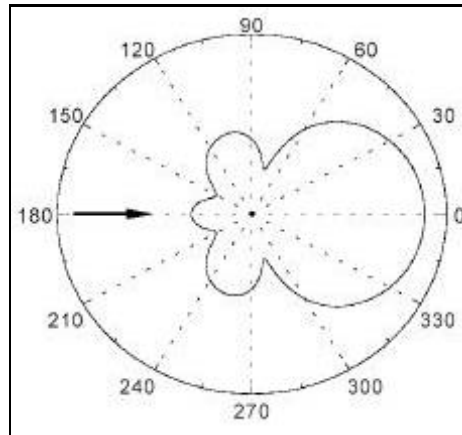


Figura 5.28: Diagrama de dispersión de luz (Rafael Bardera)

La luz dispersada aumenta con el valor de q , por lo que desde este punto de vista son preferibles partículas grandes y menores longitudes de onda λ de la luz. Habrá que buscar, por tanto, una solución de compromiso entre ambos requerimientos.

Cantidad de partículas

La distribución uniforme de partículas depende del tipo de flujo, y en la práctica es difícil de conseguir. Simulaciones teóricas han conseguido estimar el número mínimo de partículas para conseguir un buen resultado en la fase de análisis. Este número mínimo se ha fijado en 15 pares de imágenes por ventana de análisis (Keane, 1990), lo que implica 15 partículas. Este aspecto está más relacionado con el sistema de generación de partículas, que con la propia partícula.

Las partículas trazadoras utilizadas en PIV suelen tener tamaños de entre $0,5$ y $10 \mu\text{m}$ (Lourenco, 1996). Estas partículas son de materiales muy diversos, tales como poliestireno, nylon o poliestireno-látex (PSL) para flujos de agua, con diámetros del orden de 10 micras. Para flujos gaseosos se utilizan pequeñas gotas atomizadas de aceite de silicona o aceites orgánicos, como por ejemplo de oliva, con diámetros del orden de la micra. Así, en la práctica, las partículas más utilizadas para ensayos en aire son pequeñas gotas de aceite con un diámetro de $1 \mu\text{m}$ (Willert, 1997), ya que son partículas suficientemente pequeñas para seguir el flujo, que iluminadas con láseres de Nd:YAG permiten conseguir una exposición adecuada del sensor.

Sistema de iluminación

Los sistemas de PIV constan de una o varias fuentes de iluminación láser. Estos láseres pueden ser de tipo continuo (CW) de argon-ion, con una potencia de unos pocos vatios, o pulsado del tipo Nd:YAG (neodimium : yttrium aluminium garnet) que producen pulsos con energía de entre 0,1 a 0,3 julios, con una frecuencia de repetición de decenas de hertzios.

Los sistemas más utilizados son los pulsados porque ofrecen la ventaja de que el pulso de luz es de muy corta duración ($\sim$ nanosegundos), de forma que las partículas parecen “congeladas”, con lo que su imagen aparece nítida sobre el sensor del sistema de registro.

Las fuentes láser se controlan electrónicamente para producir cortos pulsos de luz, con un intervalo de separación seleccionable, pudiéndose además formar un fino plano de luz mediante la óptica adecuada.

La formación de una lámina o plano de luz se puede conseguir fácilmente empleando una lente cilíndrica en combinación con otra esférica. La lente cilíndrica expande el láser en una dirección, mientras que la lente esférica lo enfoca a una distancia aguas abajo igual a la longitud focal, haciéndolo converger hasta alcanzar su mínimo espesor, para luego divergir. El efecto de ambas lentes puede observarse en la figura 5.29. Debido a la naturaleza gaussiana del perfil de intensidad del láser, el plano de luz retiene esta propiedad en las dos direcciones, por lo que la iluminación no es homogénea.

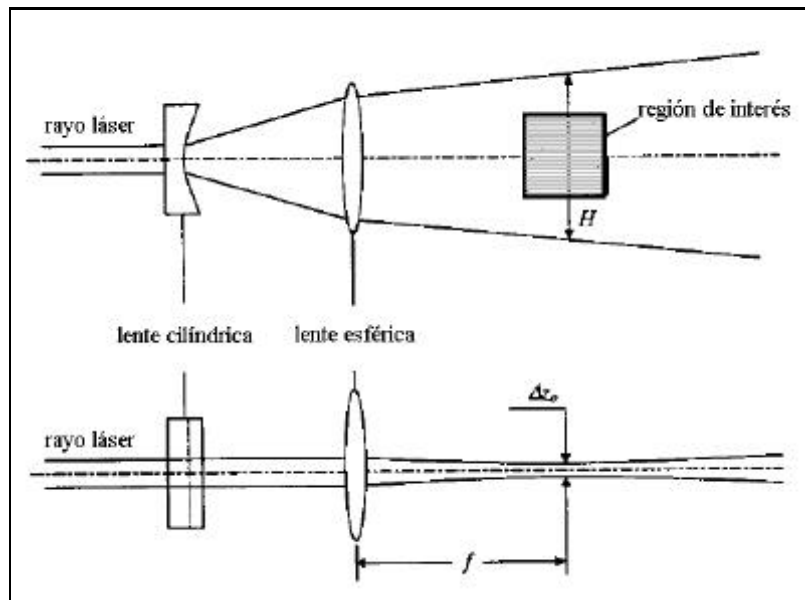


Figura 5.29: Formación del plano de luz laser (Rafael Bardera)

Sistema de registro

El sistema de registro era fotográfico en los orígenes de PIV, pero en la actualidad ha sido desbancado casi por completo por los sistemas basados en las cámaras digitales CCD, conocidos como video-PIV. La mejora en la

resolución de dichas cámaras y su reducción de precio han permitido que se incorporen en la casi totalidad de los sistemas de PIV. El sistema fotográfico ofrecía buena calidad, pero requería de un láser más potente y conllevaba el tedioso proceso de revelado, en algunos casos incluso doble, pues había que realizar una copia de contacto del negativo original (Pickering, 1984). El enfoque era crítico y en muchas ocasiones el desenfoque de las imágenes no se conocía hasta después del revelado. En el análisis sólo se podía utilizar la autocorrelación y además había que realizarlo por el método de las franjas de Young (Adrian, 1991), muestreando la imagen por puntos mediante un sistema electromecánico, lo cual resultaba demasiado lento. Más tarde la aparición de los scanners de negativos permitió abandonar el sistema de las franjas, y realizar un análisis digital de las fotografías de PIV (Willert, 1996).

Actualmente está generalizado el uso de cámaras de video CCD de resolución cada vez mayor, junto con el análisis totalmente digital mediante el uso del algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT); se tiene una calidad algo menor pero se ha ganado mucho en rapidez.

Imágenes de partículas

Uno de los tratamientos habituales en teoría de PIV va encaminado al estudio del tamaño de imagen de partícula en el plano imagen o sensor del sistema de registro (película o CCD). Para determinar este tamaño hay que considerar dos efectos; el geométrico y el de difracción, por lo que el diámetro efectivo d_e de la imagen de una partícula puede expresarse como:

$$d_e = \sqrt{(M * d_p)^2 * d_s^2} \quad (\text{Prasat, 2000}) \quad [5.24]$$

La consideración geométrica viene indicada por el factor $M d_p$, donde d_p es el diámetro de la partícula en el plano objeto (flujo), y M es la magnificación o aumento dado por,

$$M = \frac{d_i}{d_o}$$

$$d_o = (1 + M^{-1}) * f \quad [5.25]$$

$$d_i = (1 + M) * f$$

donde d_o y d_i son las distancias de la lente al plano objeto y al plano imagen respectivamente, y f la longitud focal de la lente.

El efecto de la difracción se evalúa mediante la cantidad d_s y se considera igual al diámetro del disco de Airy, de forma que puede expresarse como:

$$d_s = 2,44 * (1 + M) * \frac{f}{D} * \lambda \quad (\text{Adrian y Yao}) \quad [5.26]$$

siendo D el diámetro de apertura de la lente, λ la longitud de onda de la luz, y la relación f/D el número f ($f\#$) de la lente.

Una estimación con valores habituales en PIV, $M \sim 0,2$, $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$ (láser Nd:YAG) $f\# = 5.6$ y $d_p \sim 1 \mu\text{m}$, da un valor $d_s = 8,7 \mu\text{m}$; por tanto el efecto de difracción es dominante frente al geométrico ($d_s \gg Md_p$).

Proceso de análisis de imágenes

El proceso de análisis de imágenes de PIV tiene como fin la determinación del desplazamiento de las partículas contenidas en el flujo, lo que nos conducirá al conocimiento de la velocidad local del mismo. Para poder realizar esta tarea habrá que conocer la cantidad que se han desplazado las partículas entre los dos pulsos de luz láser.

El método de análisis de las imágenes de PIV más extendido es la correlación, ya sea sobre una sola imagen doble pulso (autocorrelación) o sobre dos imágenes monopulso (correlación cruzada).

La técnica de correlación no requiere buscar la pareja de cada partícula individual. En lugar de determinar el desplazamiento de partículas individuales, el método basado en la correlación determina el desplazamiento medio de grupos de partículas contenidas en pequeñas regiones conocidas como ventanas de análisis o puntos de interrogación. La imagen de PIV es dividida en estas regiones (ventanas de análisis) y la función de correlación se calcula secuencialmente sobre todas las ventanas, proporcionando un vector desplazamiento por ventana de análisis. Dichas ventanas suelen ser cuadradas y se distribuyen como una malla uniforme sobre la imagen de PIV del flujo.

Correlación cruzada

Este tipo de correlación estadística se establece entre dos imágenes de PIV, que corresponden cada una a un pulso de luz láser (dos imágenes monopulso) que contienen una imagen de cada partícula.

La función de correlación $C(s)$ de las intensidades $I_1(x)$ y $I_2(x)$ de las ventanas de análisis 1 y 2 viene dada por la expresión,

$$C(\vec{s}) = \int_{\text{ventana}} I_1(\vec{x}) * I_2(\vec{x} + \vec{s}) * d\vec{x} \quad (\text{Prasat, 2000}) \quad [5.27]$$

donde x es la coordenada espacial en el plano imagen y s la coordenada espacial en el plano de la correlación.

En general no suele hacerse la correlación de forma directa, pues resulta muy cara en términos de cálculo (Prasat, 2000). El cálculo de dicha función se realiza mediante el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT)

sobre la imagen digital (González y Wintz, 1987) como veremos más adelante.

La operación de correlación puede expresarse en la forma,

$$C(\vec{s}) = I_1(\vec{x}) \circ I_2(\vec{x}) \quad (\text{Prasat}, 2000) \quad [5.28]$$

donde el símbolo $\circ$ indica el operador de correlación.

Aplicando los teoremas de correlación para dos funciones (González y Wintz, 1987), podemos pasar de la correlación en el plano espacial a una multiplicación en el plano de la frecuencia, lo cual puede expresarse en la forma,

$$f(x, y) \circ g(x, y) \leftrightarrow F(\xi, \eta) * G^*(\xi, \eta) \quad (\text{McKenna}, 2002) \quad [5.29]$$

donde F representa la transformada de Fourier de la función f , y G^* el conjugado complejo de la transformada de la función g , esto es,

$$\begin{aligned} F\{f(x, y)\} &= F(\xi, \eta) \\ F\{f(x, y)\} &= G(\xi, \eta) \end{aligned} \quad [5.30]$$

donde F indica transformada de Fourier. De forma que tomando transformadas de Fourier y usando el teorema de correlación, tendremos,

$$F\{C(\vec{s})\} = F\{I_1(\vec{x}) \circ I_2(\vec{x})\} = F(u, v) * G^*(u, v) \quad [5.31]$$

Finalmente la función de correlación cruzada puede despejarse de la expresión [3.15], quedando,

$$C(\vec{s}) = F^{-1}\{F(u, v) * G^*(u, v)\} \quad (\text{Prasat}, 2000) \quad [5.32]$$

donde F^{-1} indica transformada inversa de Fourier.

Correlación cruzada de imágenes digitales

En la actualidad la mayoría de los sistemas de PIV operan con imágenes digitales, por lo que la función de correlación deberá utilizarse aplicada al campo discreto bidimensional, en cuyo caso vendrá expresada en la forma (Wereley, 2001 y Gui, 2002),

$$\Phi_{\text{cross}}(m, n) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_1(i, j) * g_2(i + m, j + n) \quad [5.33]$$

donde $g_1(i, j)$ y $g_2(i, j)$ son las distribuciones de niveles de gris de las dos muestras analizadas, restringidas a una ventana rectangular de $M \times N$ pixels. Los subíndices i, j indican la posición de cada píxel de la imagen digital.

Cuando el cálculo de la función de correlación es acelerado con la Transformada Rápida de Fourier (FFT), las funciones $g_1(i,j)$ y $g_2(i,j)$ se suponen distribuidas periódicamente en el plano i, j con periodicidad M, N (Wereley, 2001).

La figura 3.5 muestra un esquema del proceso de cálculo para encontrar la función de correlación. Las transformadas de Fourier realizadas con FFT se han denotado por $\hat{g}_1$ y $\hat{g}_2$.

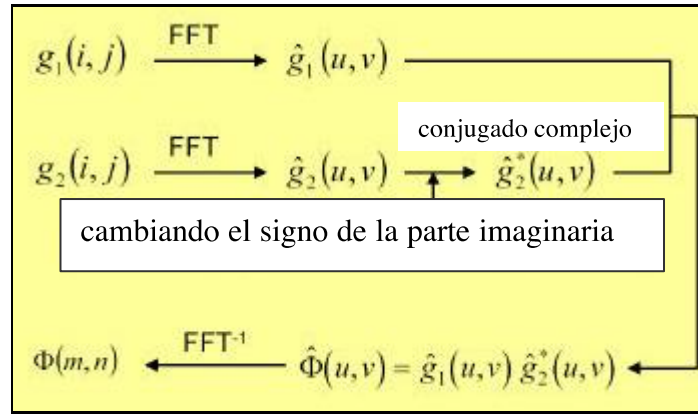


Figura 5.30: Proceso de cálculo de la correlación (Rafael Bardera)

Autocorrelación

La autocorrelación es un caso particular de correlación, ya que la imagen se correlaciona consigo misma. Se trata de una imagen de PIV doblemente expuesta (dos pulsos láser), es decir, contiene dos imágenes de cada partícula.

Procediendo de forma análoga al caso de correlación cruzada, la función de autocorrelación $R(\vec{s})$ de la intensidad $I(\vec{x})$ de la ventana de análisis viene dada por la expresión,

$$R(\vec{s}) = I(\vec{x}) \circ I(\vec{x} + \vec{s}) = \int_{\text{ventana}} I(\vec{x}) * I(\vec{x} + \vec{s}) * d\vec{x} \quad (\text{Adrian, 1991}) \quad [5.34]$$

Tomando transformadas de Fourier y usando el teorema de correlación, tendremos,

$$F\{R(\vec{s})\} = F\{I(\vec{x}) \circ I(\vec{x})\} = F\{I(\vec{x})\} * F^*\{I(\vec{x})\} = F|I(\vec{x})|^2 \quad [5.35]$$

de donde la función de autocorrelación puede despejarse, quedando

$$\Phi_{\text{cros}}(m,n) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g(i,j) * g(i+m,j+n) \quad [5.36]$$

Desplazamiento de las imágenes de partículas

Una vez calculada la función de correlación correspondiente a cada ventana de análisis, debemos determinar el desplazamiento medio de las partículas en dicha ventana.

Correlación cruzada

El desplazamiento medio (s_x , s_y) de las imágenes de partículas contenidas en la ventana, viene determinado por la posición del valor máximo de la función de correlación cruzada,

$$s_x = m^*; \quad s_y = n^* \quad \text{para}$$

$$\Phi_{cruzada}(m^*, n^*) = \max(\Phi_{cruzada}(m, n)) \quad [5.37]$$

$$-\frac{M}{2} \leq m < \frac{M}{2}; \quad -\frac{n}{2} \leq n < \frac{n}{2}$$

La figura 3.5. muestra la función de correlación cruzada, y la localización del pico más alto, el cual da la medida del desplazamiento de las partículas contenidas en la ventana analizada.

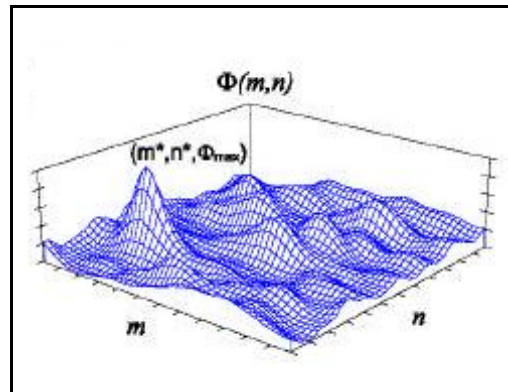


Figura 5.31: Función de correlación cruzada (Rafael Bardera)

Autocorrelación

La función de autocorrelación tiene un máximo en la posición ($m = 0$, $n = 0$) y dos máximos secundarios situados simétricamente en las posiciones (s_x , s_y) y ($-s_x$, $-s_y$). El máximo central indica el origen de medida en el plano de la correlación, de forma que su distancia a los máximos secundarios indica el desplazamiento de las partículas. En la figura 5.32 puede observarse la función de autocorrelación, con el pico central más alto y los dos máximos secundarios situados simétricamente a cada lado del pico central.

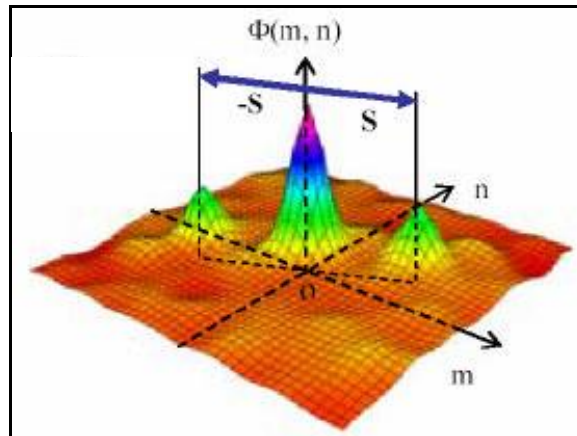


Figura 5.32: Función de autocorrelación (Rafael Bardera)

Autocorrelación vs correlación cruzada

Las figuras 5.31 y 5.32 muestran el plano de correlación para las dos opciones posibles: correlación cruzada o autocorrelación. La autocorrelación muestra un pico central más alto que sirve para indicar el origen del plano de correlación, luego aparecen dos máximos secundarios separados distancias s y $-s$, apareciendo el llamado problema de ambigüedad direccional, pues no sabemos cual de ambos picos corresponde al desplazamiento real de las partículas, y para resolver tal problema deben utilizarse elementos adicionales (espejo rotatorio, Raffel, 1994). La figura de correlación cruzada (cross-correlation) presenta directamente como pico más alto el correspondiente al desplazamiento de las partículas.

En la actualidad se prefiere utilizar el análisis por correlación cruzada, porque ofrece ciertas ventajas (Prasat, 2000) frente al análisis de autocorrelación,

- el pico central de autocorrelación desaparece.
- se duplica la señal del pico de desplazamiento.
- se elimina la ambigüedad direccional (un solo pico en lugar de dos simétricos).
- mejora la relación señal-ruido.

La medida del desplazamiento de las partículas se realiza siempre en el plano imagen (sensor) y nuestra incógnita es el desplazamiento (velocidad) en el plano fluido (plano objeto). Ambos planos se relacionan mediante el aumento o magnificación del sistema óptico de registro, dado por la expresión [5.38]. Por tanto, se cumple la relación:

$$\vec{X} = M * \vec{x} \quad [5.38]$$

donde $\vec{X}$ y $\vec{x}$ son los vectores desplazamiento en el plano objeto (fluido) y en el plano imagen (sensor) respectivamente. El valor de M se determina mediante calibración en cada experimento.

Post-procesado

Una vez conocido el desplazamiento de las imágenes de partículas, en general, la velocidad es calculada automáticamente por el software al que habrá que aportarle información del tiempo entre pulsos y de la magnificación.

Cuando se ha calculado la velocidad se pueden realizar diversas operaciones; obtención de magnitudes estadísticas de los resultados (medias, desviaciones, etc.), validación, relleno de huecos (vectores espurios) producidos por análisis erróneo, cálculo de magnitudes derivadas de la velocidad, etc..

La presentación de resultados suele hacerse mediante mapas de vectores velocidad donde pueden apreciarse claramente las tendencias del flujo, así como la magnitud de la velocidad en cada punto, pues los vectores están escalados.

5.3.3 Montaje del sistema de PIV

Para poder llevar a cabo las mediciones del PIV, usaremos un sistema de medición proporcionado por la compañía TSI. El conjunto cuenta con:

- Laser YAG.
- Ópticas para plano laser y brazo articulado.
- Sincronizador.
- Cámara CCD.
- Ordenador con el software INSIGHT 3G.

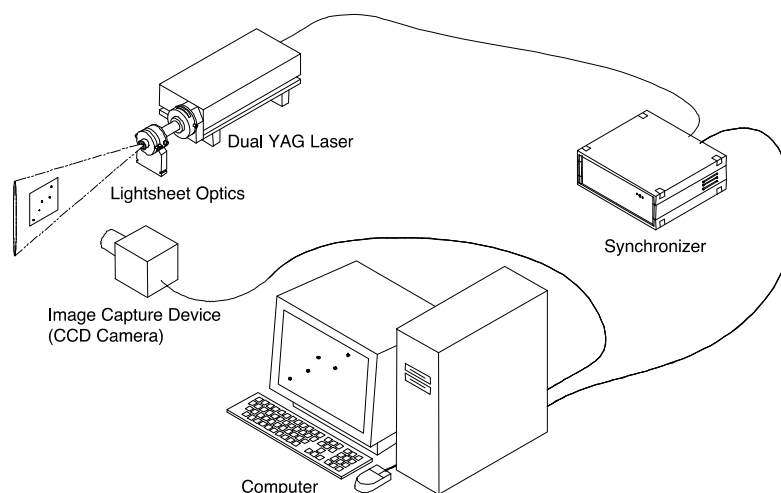


Figura 5.33: Vista general del sistema de PIV (www.TSI.com)

Laser YAG (modelo MESA PIV)



Figura 5.34: Laser YAG con equipo de refrigeración y ópticas

Características técnicas:

Longitud de onda (nm)	532
Potencia a 10 kHz (W)	60
Energía por oscilación (mJ) a 1-6 kHz	5
Energía total de pulso (mJ) a 1-6 kHz	10
Ratio de repetición (kHz)	1-40
Estabilidad entre pulsos (%RMS)	< 2
Anchura del pulso (ns)	< 190
Estabilidad del rayo (μrad RMS)	< 20
Diámetro del rayo (mm)	5
Divergencia del rayo (mrad)	7
Calidad del rayo (M)	< 25
Polarización	circular

Tabla 5.3: Características técnicas del laser YAG (www.TSI.com)

Ópticas para plano laser y brazo articulado



Figura 5.35: Brazo articulado y lentes (www.TSI.com)

Características técnicas

Giro en cada articulación (°, deg)	360
Longitud total (m)	1,8
Peso (kg)	7
Óptica	Lente cilíndrica de -25 mm

Tabla 5.4: Características técnicas del brazo articulado y las lentes (www.TSI.com)

Sincronizador (modelo 610035)

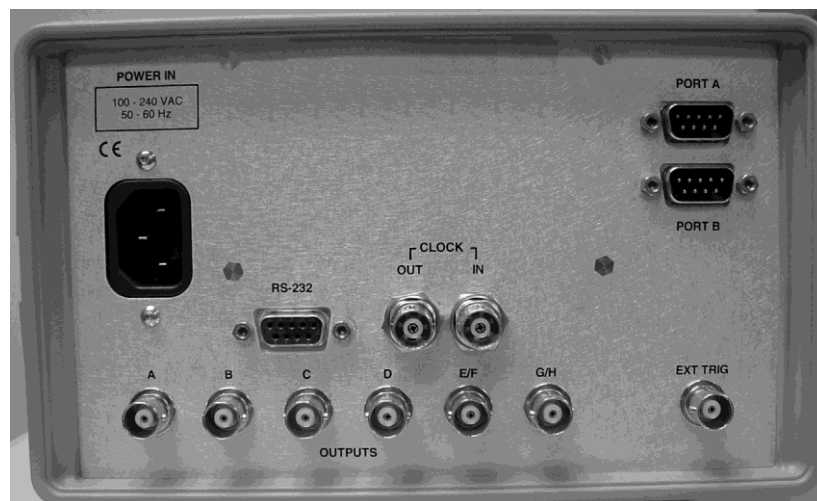


Figura 5.36: Salidas del sincronizador (www.TSI.com)

Características técnicas

Retraso de pulso (s)	0 - 1000
Tiempo entre pulsos (ns, s)	10, 1000
Resolución temporal (ns)	1
Salidas	TTL/ CMOS, ajustable 2 – 20 V, 35 V
Impedancia (Ω)	50
Voltaje de operación	120/220 VAC, 50 – 60 Hz
Dimensiones (mm)	203x120x267
Peso (kg)	1,1

Tabla 5.5: Características técnicas del sincronizador (www.TSI.com)

Cámara CCD (modelo 630059)



Figura 5.37: Cámara CCD (www.TSI.com)

Características técnicas

Resolución (píxeles)	2048x2048
Tamaño de los píxeles (μm)	7,4x7,4
Rango del espectro (nm)	de 340 a 740
Tiempo de exposición	de 42 μs a 105 ms
Modos	Continuo, ráfaga y único disparo
Fuente de alimentación	12 VDC, 6 W
Dimensiones (mm)	45x68x66
Peso (kg)	0,8

Tabla 5.6: Características técnicas de la cámara CCD (www.TSI.com)

Gafas de seguridad (para un laser YAG)

Características técnicas

Energía por pulso (J)	2 máx
Duración del pulso (ns)	2 – 40
Longitud de onda (nm)	de 1064 a 532

Tabla 5.7: Características técnicas de las gafas de seguridad (www.TSI.com)

5.3.4 Toma de fotografías del PIV

Primero de todo hay que conectar la cámara y el láser al sincronizador, que a su vez está conectado al ordenador y es manejado por el software INSIGHT 3G. Como ya hemos visto anteriormente, el proceso consiste en la toma de dos fotografías seguidas, en dos pulsos del láser, con un intervalo de tiempo conocido. Para que las fotos salgan bien iluminadas, el láser y la cámara han de estar perfectamente sincronizados, ya que el tiempo de exposición es del orden de los microsegundos, de ahí el uso de un sincronizador aparte.

Para empezar, se enciende la refrigeración por agua del láser, hay que esperar a que el sistema de refrigeración se estabilice a 100 °C antes de empezar a utilizar el láser. Una vez el láser esté encendido hay que asegurarse siempre de llevar las gafas de protección. Encendemos el ordenador y entramos en INSIGHT 3G, seleccionamos la opción “New Experiment” y posteriormente “New Run”, asegurándonos de que todo se va a guardar en una misma carpeta dentro de la zona de experimentos del programa y de que esa carpeta esté completamente vacía.

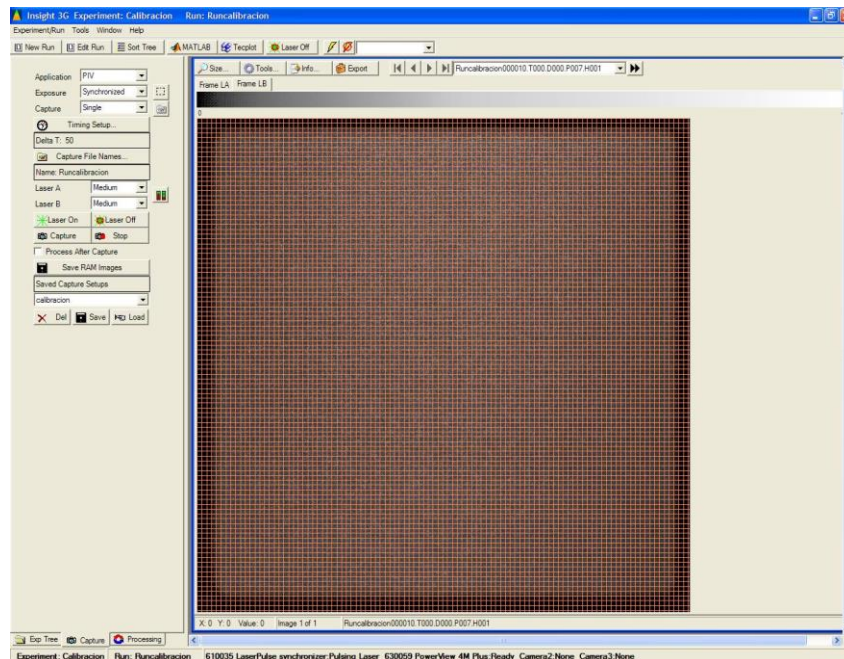


Figura 5.38: Pantalla principal del programa

Encendemos el láser (con el obturador cerrado), el sincronizador y la cámara, y nos aseguramos en la pestaña “Tools” de que todos los aparatos se han reconocido correctamente. Ahora situamos la cámara en modo “Free” y “Continuous” para que esta grabe vídeo sin guardar nada, introducimos el modelo en el túnel, encendemos el láser desde la opción “Laser On” y pulsamos “Capture”. La cámara empezará a grabar y podremos ver el interior de la zona de pruebas, hay que mover el láser y la cámara de forma que el plano láser ilumine perfectamente la zona del modelo que se planea fotografiar.



Figura 5.39: Colocación de la cámara y el modelo en el túnel de viento

Introducimos una regla a la altura del plano del láser y enfocamos la cámara hasta que los números se vean bien. Volvemos al programa y colocamos la cámara en el modo de exposición “Free” y en el modo de captura “Single”. Tomamos una foto haciendo clic en la opción “Capture” y nos vamos a la pestaña de procesado del programa, pulsamos en los ajustes de “Spatial Calibration” y en la pestaña “Measured” hacemos clic en “Measure”. Seleccionamos un punto inicial y otro final de la regla e introducimos la medida real, esto hará que el programa asigne a esa medida un número determinado de píxeles y calibre espacialmente la visión de la cámara para que las medidas obtenidas sean reales.

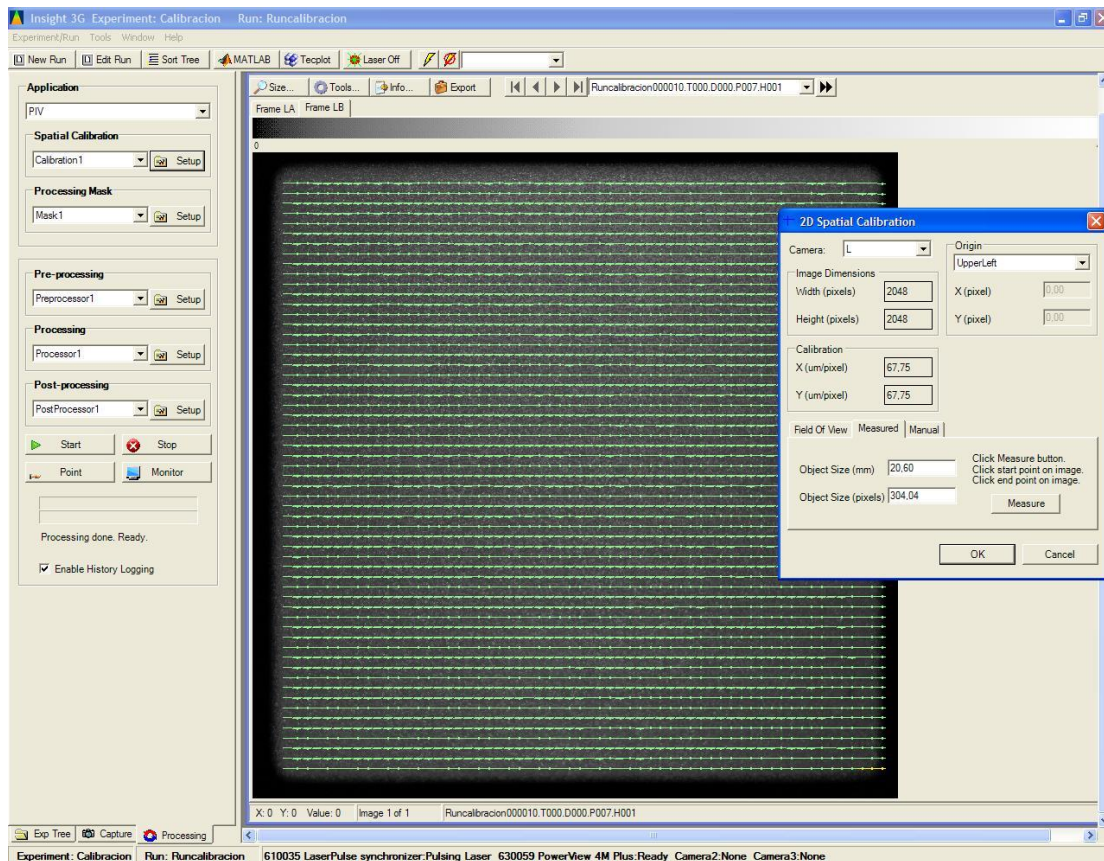


Figura 5.40: Calibración espacial de la cámara

Cerramos la zona de pruebas la tapamos para evitar que entre cualquier luz del exterior, ya que una luz distinta del láser podría provocar reflejos o brillos indeseados. En la pestaña de captura, pulsamos en “Timing Setup” y nos aparecerán las siguientes opciones:

- **PIV Frame Mode:** Indica el modo de toma de fotogramas, utilizaremos la opción “Straddle”, que genera una ráfaga de dos fotos.
- **Laser Pulse Delay:** Indica el retraso en microsegundos del pulso laser, se usará un tiempo de 400 microsegundos.
- **Delta T:** Intervalo de tiempo, en microsegundos, entre los dos fotogramas captados por la cámara. Cuando se procesan las imágenes obtenidas, se divide el área de la foto en distintas regiones. Cada una de estas regiones recoge un determinado número de partículas que se sitúan de una manera única dentro de la celda formando una “huella”, el programa sigue esta huella entre los dos fotogramas y ve cuanto se ha desplazado ese grupo de partículas. Dependiendo de la velocidad del flujo, el intervalo de tiempo entre fotos marca la distancia que se mueven las partículas entre fotogramas, si la distancia es mayor a un 25 % del tamaño de la celda, la posición de las partículas dentro de una región puede variar, dando errores en el procesado del programa, ya que este no puede seguir la huella. Por eso esta opción variara en función de la velocidad del flujo, en nuestro caso se usó un “Delta T” de:

Delta T (μ s)	Velocidad del flujo (m/s)
50	0 - 10
30	10 - 20
20	20 - 25

Tabla 5.8: Delta T en función de la velocidad del flujo

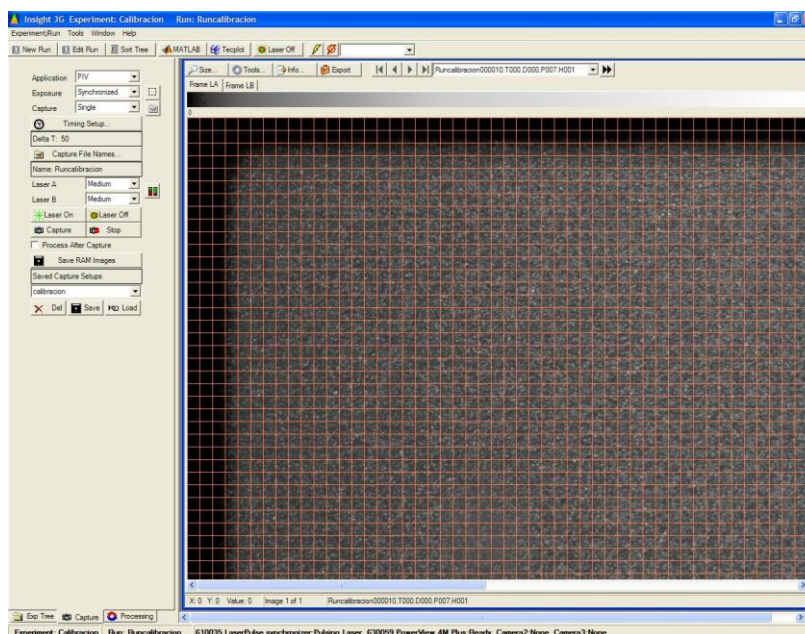


Figura 5.41: División de la imagen en regiones

- **PIV Exposure:** Indica el tiempo de exposición de la cámara en microsegundos, el obturador de la cámara debe de estar abierto el tiempo de retraso del láser más el Delta T para asegurar que las dos imágenes salen iluminadas.

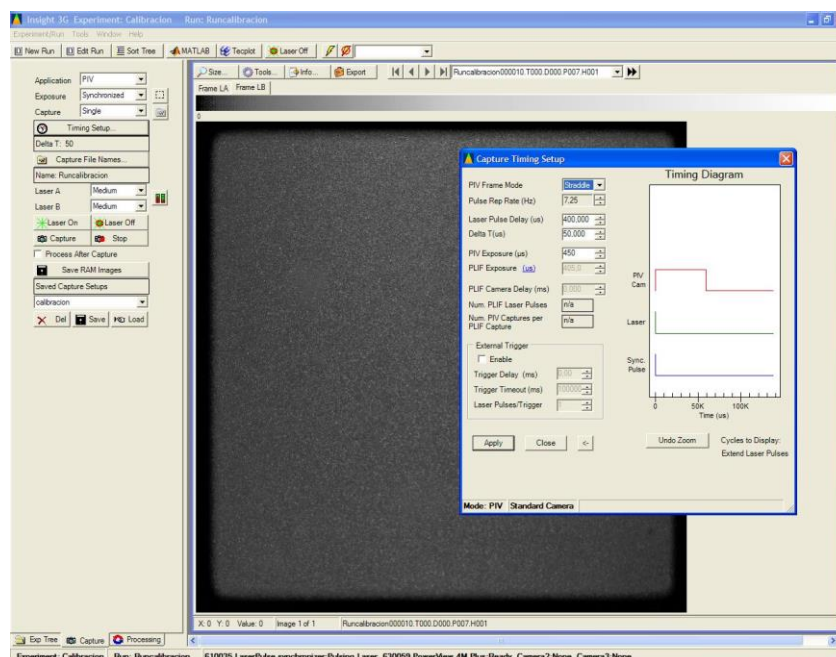


Figura 5.42: Timing Setup

Colocamos la cámara en el modo de exposición “Synchronized” y en el modo de captura “Single”, encendemos el túnel e inyectamos las partículas dentro del flujo. Una vez este todo listo, pulsamos en “Capture” y el láser lanzará una ráfaga de la que se sacarán dos fotos como las que se muestran a continuación.



Figura 5.43: Fotograma A y B de una captura

5.3.5 Procesado de fotografías

Una vez hechas las capturas, nos vamos a la pestaña de procesado del programa, en el que nos aparecerán varios campos a rellenar.

Calibración espacial

Como hemos visto antes, aquí se introduce la relación entre el tamaño de un objeto en la realidad y el número de píxeles que abarca en la fotografía, permitiendo que luego se puedan procesar vectores de velocidad con medidas reales.

Máscara de procesado

Cuando se introduce un objeto sólido en el túnel, dentro de este no existe flujo alguno, por lo que en el procesado de imágenes la zona ocupada por el modelo puede dar origen a vectores de velocidad espurios. Para evitar esto, se puede acotar la zona de procesado de la imagen con esta opción, mediante distintos tipos de formas geométricas o definiendo la zona punto por punto.

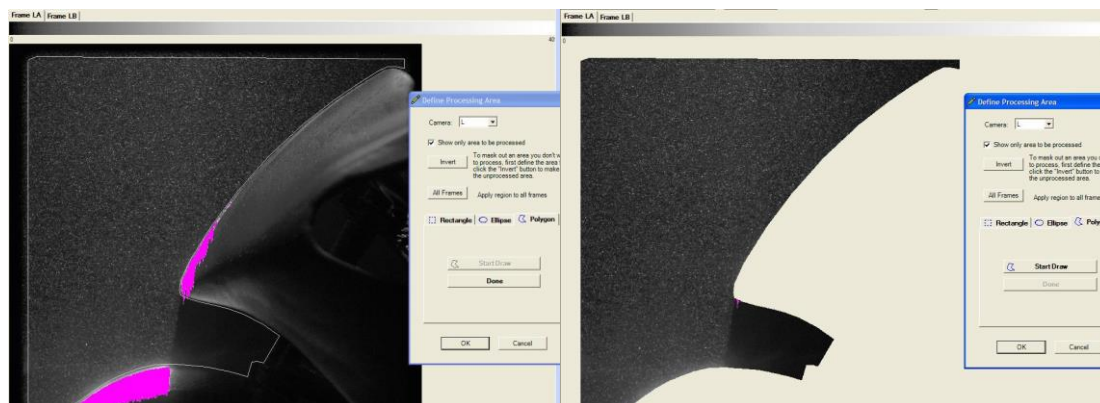


Figura 5.44: Acotación del área de procesado

Pre-procesado

En este apartado se introducen filtros para mejorar la captación de partículas, en nuestro caso se utilizó un aumento del contraste para captar mejor el brillo de las partículas.

Procesado

Usaremos el sistema de procesado que viene por defecto en el programa, que irá bien para nuestro caso, salvo el tamaño de las regiones, que se reducirá a 32 píxeles para obtener una mayor resolución del flujo. Si se está utilizando una máscara, se debe seleccionar “Gaussian Mask” en el campo “Spot Mask Engine”.

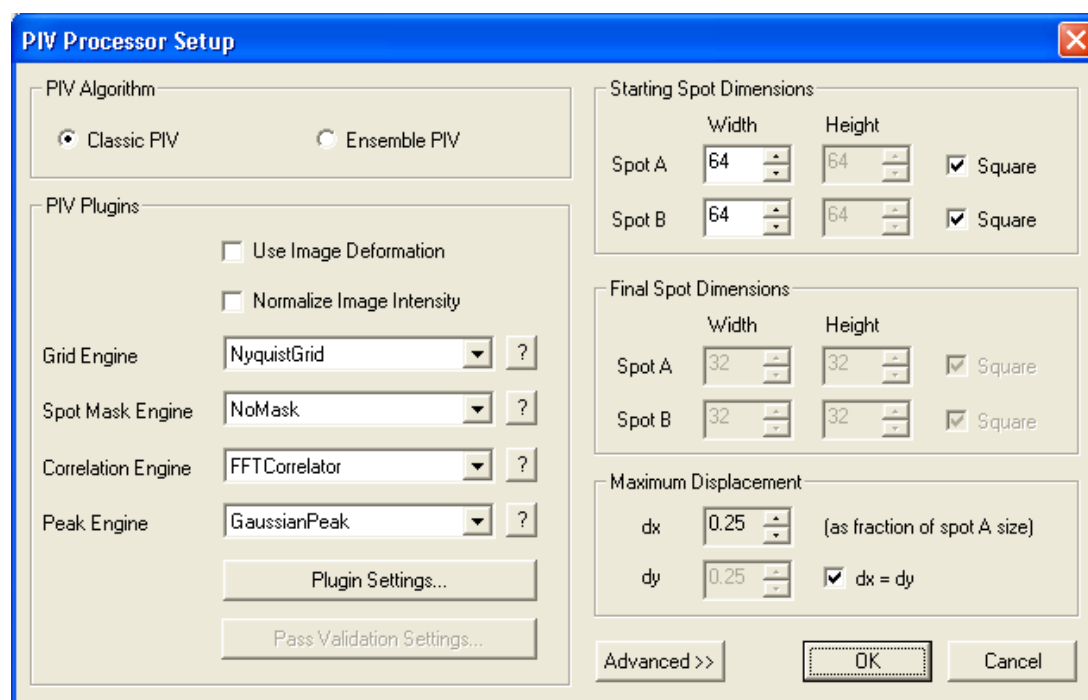


Figura 5.45: Datos de procesado por defecto

Post-Procesado

Cuando procesemos la imagen utilizando las opciones anteriores, obtendremos una imagen como la siguiente

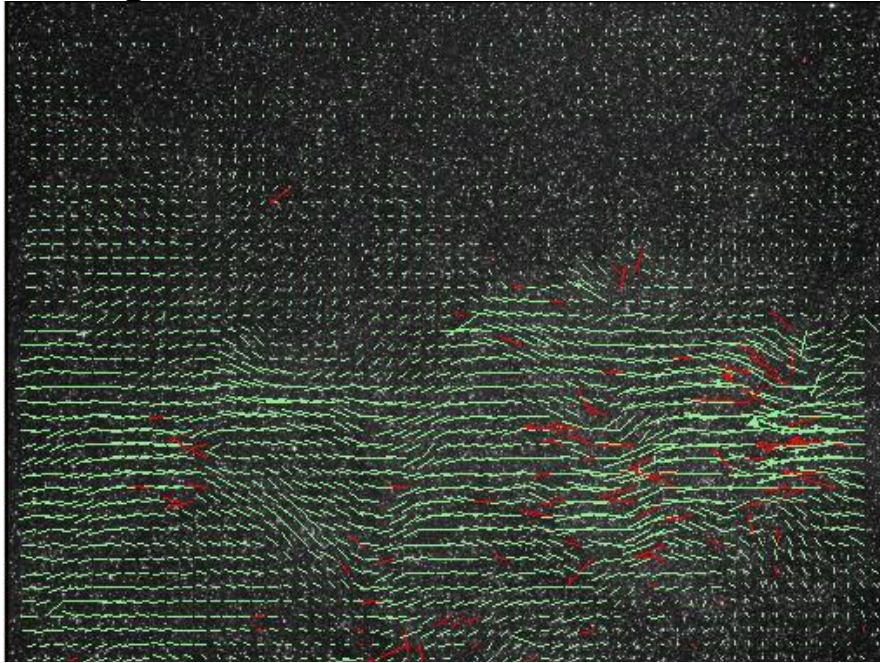


Figura 5.46: Imagen procesada (INSIGTH 3G tutorial)

Como vemos en imagen, aparecen vectores de color rojo y otros de color verde, los vectores rojos son aquellos en los que el vector velocidad de un grupo de partículas se aleja mucho de la velocidad de los vectores adyacentes, estos vectores son debidos a datos erróneos. Para eliminar esos vectores, la pestaña de post-procesado nos ofrece varias opciones, de las que se utilizara una validación local de la media. Esta opción cambia los vectores rojos por un vector que es la media de los vectores adyacentes, dando lugar a la siguiente imagen.

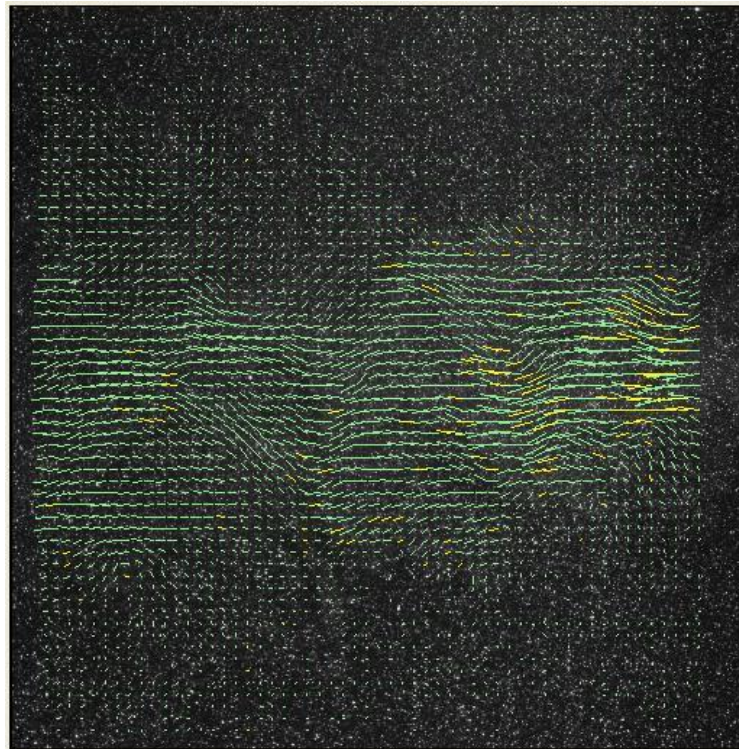


Figura 5.47: Imagen post-procesada (INSIGHT 3G tutorial)

Para ver si los datos que estamos obteniendo son correctos, se vacía la zona de pruebas y se pone el túnel de viento a una velocidad conocida, al hacer el análisis del PIV del flujo dentro del túnel deberíamos obtener un flujo uniforme de vectores con un valor igual a la velocidad que se calibró con la sonda anteriormente.

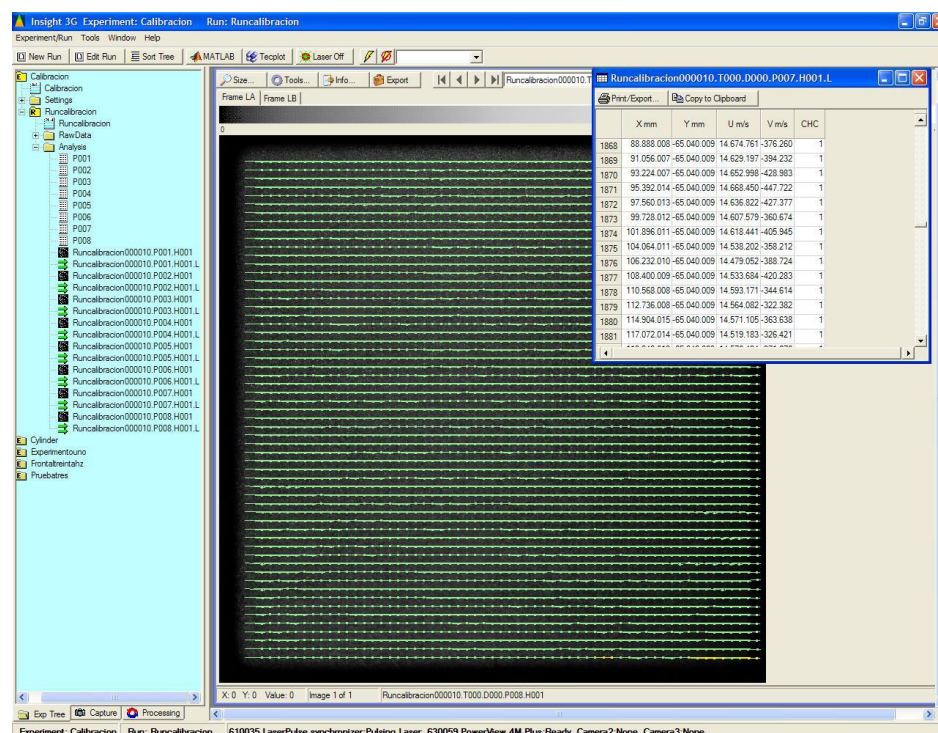


Figura 5.48: Flujo uniforme en el túnel a 30 Hz

La figura anterior se obtuvo con una frecuencia del ventilador de 30 Hz que según nuestra gráfica de calibración corresponde a 14,5 m/s. Como se ve se obtiene un flujo uniforme con velocidades que oscilan alrededor de los 14,5 m/s, por lo que la calibración espacial está bien especificada.

Se procede ahora a analizar las distintas zonas del modelo a escala fabricado en los apartados anteriores, bajo distintas velocidades, para hacer un análisis de cómo se comporta el flujo alrededor del modelo y aguas abajo, con un posterior análisis más exhaustivo que se verá en los siguientes apartados. Todos los análisis del PIV que se han obtenido durante el proyecto se pueden ver en los anexos.

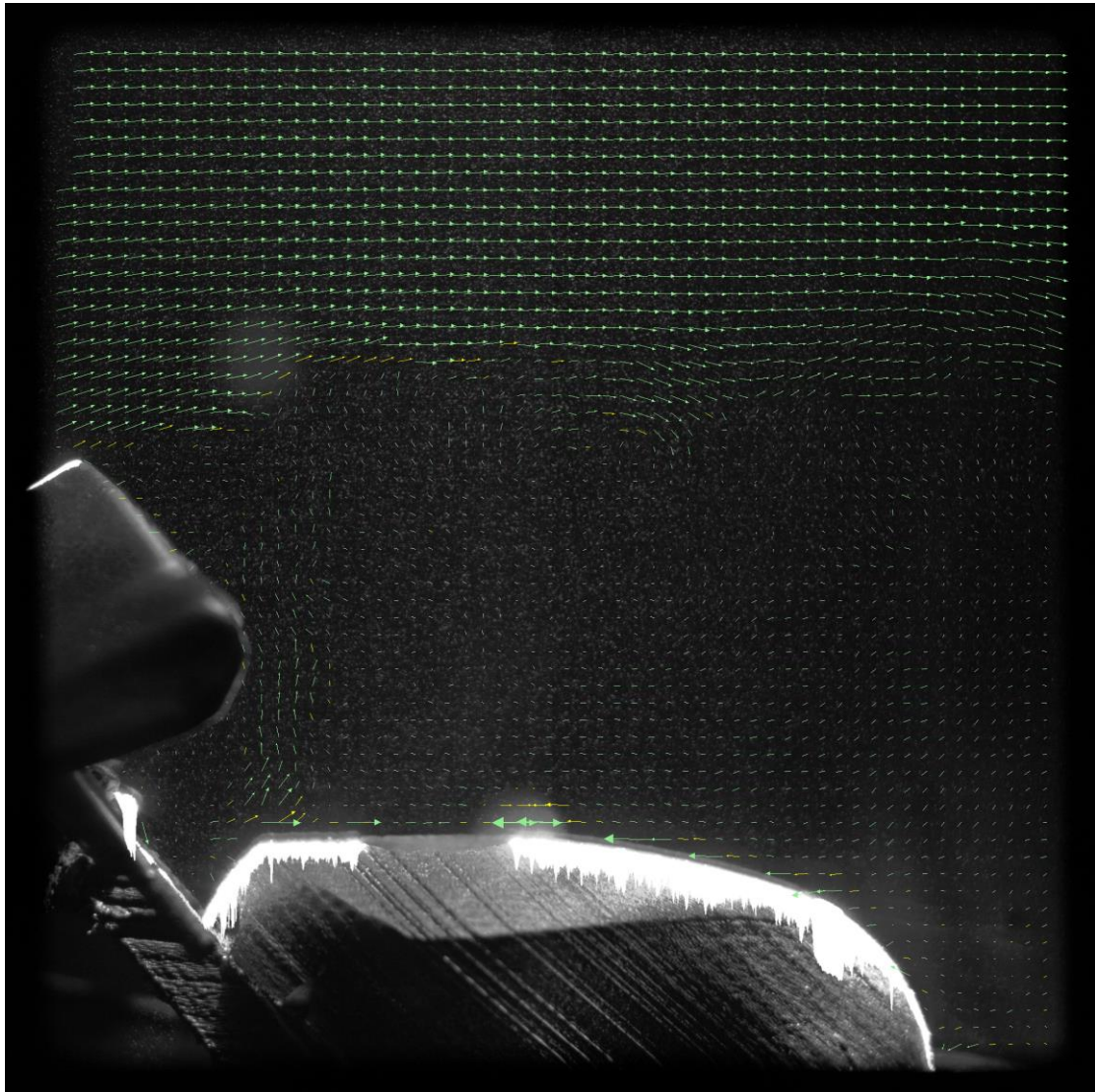


Figura 5.49: Flujo sobre el depósito a 50 Hz

6 Simulación con OpenFOAM

Todos los equipos y sistemas inventados por el hombre se rigen por leyes físicas fundamentales que permiten su utilidad en la sociedad. Para un túnel aerodinámico el principio fundamental que se pone de manifiesto es el de reversibilidad del movimiento. De acuerdo a éste, en lugar de observar el movimiento de un cuerpo en su medio inmóvil, podemos observar el movimiento del medio con relación al cuerpo inmóvil. En este caso, la velocidad del flujo no perturbado en un medio reversible será igual a la velocidad del mismo cuerpo cuando el aire está inmóvil.

La posibilidad de reversibilidad del movimiento es debido a que las fuerzas aerodinámicas dependen solo del movimiento relativo del cuerpo y el aire.

Todo esto, más el costo de los medios para realizar tales experimentos hace que en la aerodinámica sea muy empleado el método de modelación y simulación para la experimentación en condiciones de laboratorios.

Los avances tecnológicos en el área de la computación ofrecen la oportunidad de resolver complejos modelos de la Dinámica de Fluidos a través de medios Computacionales. En este caso se ha elegido el software de código abierto OpenFOAM, que es un poderoso código computacional de CFD creado para modelar el comportamiento de fluidos (solución numérica de ecuaciones de Navier-Stokes).

Las técnicas CFD, "Computational Fluid Dynamics" se componen de tres elementos principales, el preprocesador, el módulo de solución o "solver" y el postprocesador.

El preprocesador se utiliza para definir el problema para su resolución a través de solver. La región de fluido que va a ser analizada se denomina dominio computacional y está formada por un número discreto de elementos que forman la malla. Se necesitan definir las condiciones de contorno, "boundary conditions". También es necesaria una condición inicial a partir de la cual se inicia el estudio del flujo. Esto se debe al carácter parabólico-elíptico de las ecuaciones de Navier-Stokes.

El solver es el módulo de resolución de las ecuaciones del problema de CFD. Aquí es donde se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes mediante un proceso iterativo que se encargará de calcular los parámetros del flujo en el transcurso del tiempo. La convergencia (valor numérico hacia el que tiende la solución) es un factor importante para obtener un resultado preciso de las ecuaciones en derivadas parciales. Otro factor a considerar es el residuo de cada variable: diferencia entre el valor de la solución nueva y la anterior. Cuando los residuos toman un valor muy bajo, se considera que la solución ha convergido. En la ingeniería, normalmente se intentan obtener unos

residuales de entre cuatro a seis órdenes de magnitud de los valores finales para lograr que la convergencia de la solución tenga un nivel aceptable.

Por último, el postprocesador se utiliza para visualizar y procesar, tanto cualitativa como cuantitativamente, los resultados de la simulación. En los paquetes actuales de CFD, los fenómenos analizados en el flujo pueden presentarse en gráficos de vectores o de contornos que muestren la tendencia de la velocidad, presión, energía cinética y otras propiedades del flujo.

El objetivo que se persigue es conseguir para las unas condiciones próximas al túnel unos resultados que certifiquen los obtenidos mediante las mediciones experimentales.

6.1 Geometría

Se parte del diseño CAD del conjunto que integra la motocicleta, el cual está compuesto por los elementos carenado, depósito-sillín y chasis. El CAD se encuentra en extensión .SLDASM que es típica de un ensamblaje creado en SolidWorks.

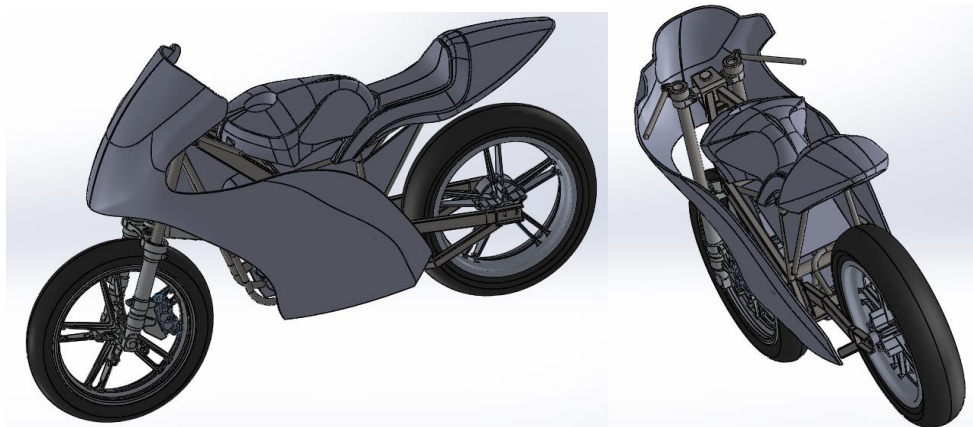
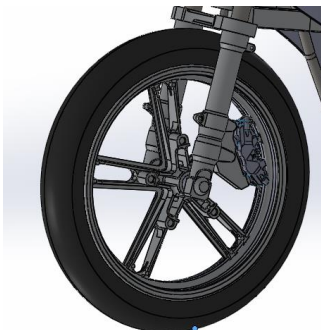


Figura 6.1: Ensamblaje del carenado, chasis y depósito-sillín.



Tiene gran relevancia la localización del punto de origen de la geometría, dado que luego será interpretado como punto de referencia en el posicionamiento de la geometría dentro de la malla generada en OpenFOAM. En la figura 6.1 se puede apreciar que el punto de origen (punto azul) está ubicado en el punto más bajo de la zona de rodadura de la rueda delantera.

Figura 6.2: Punto origen.

6.2 Malla

a) Estereolitografía (.STL)

Para propiciar una comunicación entre la geometría CAD y el generador de mallado de OpenFOAM es necesario una conversión del formato .SLDASM a un **formato de archivos estándar de prototipado rápido** como es el **archivo .STL**. Este tipo de archivo utiliza una malla de pequeños triángulos planos sobre las superficies para definir la forma del objeto (Estereolitografía). Para que un objeto definido en un archivo .STL se construya correctamente los triángulos deben encajar perfectamente entre ellos sin huecos ni superposiciones.

Normalmente, se debe establecer un equilibrio entre detalle y tamaño del archivo. Por ejemplo, para representar cualquier superficie curvada se necesita gran cantidad de triángulos planos (facetas), especialmente si se quiere conseguir una curva suave. Sin embargo, esto genera archivos muy grandes, que pueden resultar difíciles de manejar.

Los archivos .STL describen solo la geometría de superficies de un objeto tridimensional sin ninguna representación de color, textura u otros atributos comunes de los modelos de CAD.

La mayoría de paquetes de software modernos soportan la exportación directa a .STL tanto en formato ASCII como binario. Los dos contienen la misma información pero uno de ellos puede ser leído (y editado) con un simple editor de texto y el otro debe ser escrito byte a byte por software. Los tres puntos que conforman una faceta 3D más el vector que describe su dirección normal define cada faceta en un .STL.

```
motorBike
  facet normal 9.849223e-001 -1.729964e-001 6.360837e-004
    outer loop
      vertex 1.880363e+000 5.160044e+001 3.169595e+001
      vertex 1.880400e+000 5.160065e+001 3.169574e+001
      vertex 1.880392e+000 5.160062e+001 3.169636e+001
    endloop
  endfacet
  facet normal 9.849857e-001 -1.725460e-001 5.567380e-003
    outer loop
      vertex 1.881786e+000 5.160585e+001 3.155730e+001
      vertex 1.881570e+000 5.160518e+001 3.157788e+001
      vertex 1.879699e+000 5.159462e+001 3.157752e+001
    endloop
  endfacet
  facet normal 9.850044e-001 -1.724497e-001 5.248247e-003
    outer loop
      vertex 1.879699e+000 5.159462e+001 3.157752e+001
      vertex 1.881570e+000 5.160518e+001 3.157788e+001
      vertex 1.879714e+000 5.159484e+001 3.158274e+001
    endloop
  endfacet
  facet normal 9.849950e-001 -1.725342e-001 4.095045e-003
    outer loop
      vertex 1.879714e+000 5.159484e+001 3.158274e+001
      vertex 1.880541e+000 5.160046e+001 3.161679e+001
      vertex 1.879848e+000 5.159670e+001 3.162668e+001
    endloop
  endfacet
```

Figura 6.3: Parte del contenido de datos del archivo .STL.

SolidWorks además de permitirnos elegir entre el formato ASCII o binario, también nos posibilita configurar otras opciones de resolución, muy importantes como es la resolución a la hora de llevar a cabo la exportación:

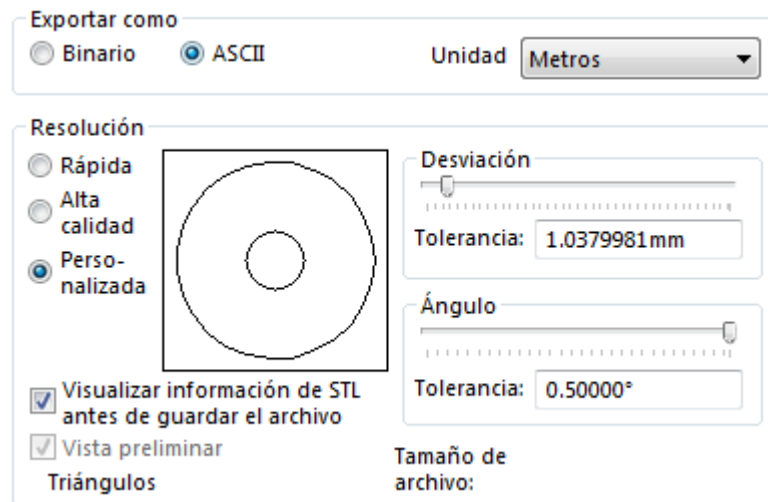


Figura 6.4: Configuración en la fase de guardado del archivo .STL en SolidWorks.

- **La resolución** controla la triangulación de las superficies no planas para la salida de estereolitografía (.STL). Una configuración de desviación más baja produce un archivo .STL con una triangulación más fina. Los archivos generados con configuraciones de precisión alta son más grandes en tamaño y más lentos en generación.
 - **Grueso o Fino.** Selecciona una de estas resoluciones preconfiguradas.
 - **Personalizada.** Permite el arrastre de los controles deslizantes **Desviación** y **Ángulo** para ajustar la resolución o la introducción de los valores para la **Tolerancia** de desviación y la **Tolerancia** de ángulo. Si hace clic en **Personalizado**:
 - El Arrastre del control deslizante **Desviación** ajusta la **Tolerancia** de desviación, que controla la triangulación de toda la pieza. Los números bajos generan archivos con una mayor precisión de pieza completa.
 - El Arrastre del control deslizante **Ángulo** configura la **Tolerancia** de ángulo, que controla la triangulación de detalles más pequeños. Los números menores generan archivos con una mayor precisión de detalles menores, pero dichos archivos tardan más en generarse.
- **No convertir los datos de salida de STL a espacio positivo.** Hace que las piezas exportadas mantengan su posición original en el espacio global, relativo al origen.

- **Guardar todos los componentes de un ensamblaje en un único archivo** (sólo ensamblajes). Guarda el ensamblaje y cada uno de sus componentes en un único archivo .STL.
- **Buscar interferencias** (sólo ensamblajes). Realiza una verificación de interferencias en un documento de ensamblaje antes de guardarlo. La exportación de un ensamblaje con sólidos coincidentes o de interferencia a un único archivo .STL tiene como resultado un archivo que puede no ser el adecuado para algunos sistemas de prototipo rápido.
- **Sistema de coordenadas de salida.** Se selecciona un sistema de coordenadas para aplicar con fines de exportación.

Este archivo .STL en formato ASCII ya puede ser directamente interpretado por OpenFOAM, sin embargo, es recomendable, es uso de un software intermedio como es MeshLab.

b) MeshLab

Es un código abierto, portátil y sistema extensible para el procesamiento y edición de mallas triangulares no estructuradas en 3D.

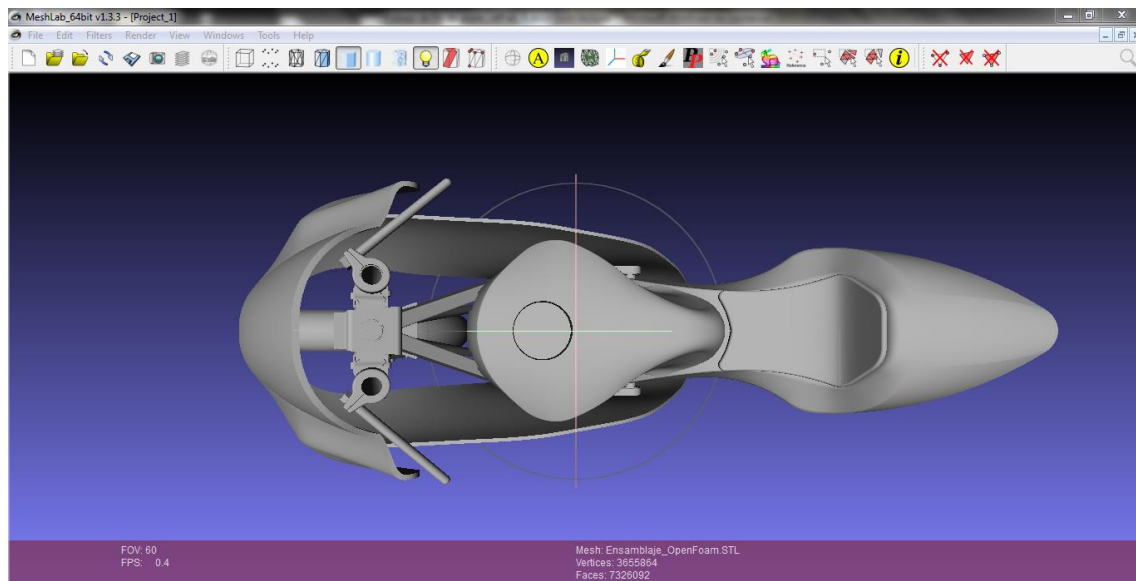


Figura 6.5: Interfaz del software MeshLab.

El sistema está destinado a ayudar a la transformación de los no tan pequeños modelos no estructurados típicos en 3D, proporcionando un conjunto de herramientas para la edición, la limpieza, la curación, la inspección, el procesamiento y la conversión de este tipo de mallas.

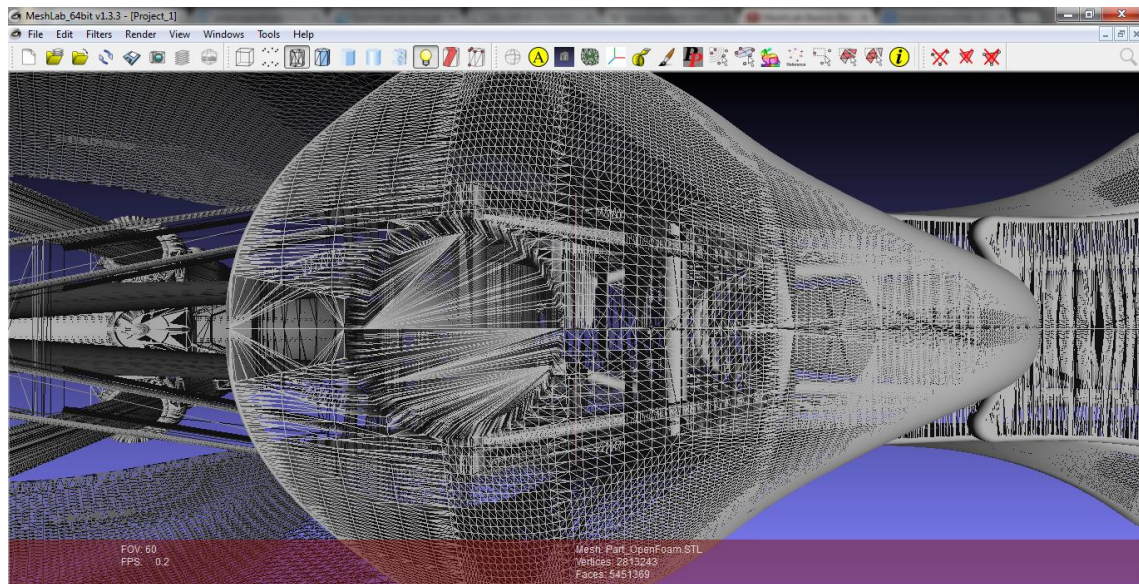


Figura 6.6: Malla en la zona del depósito.

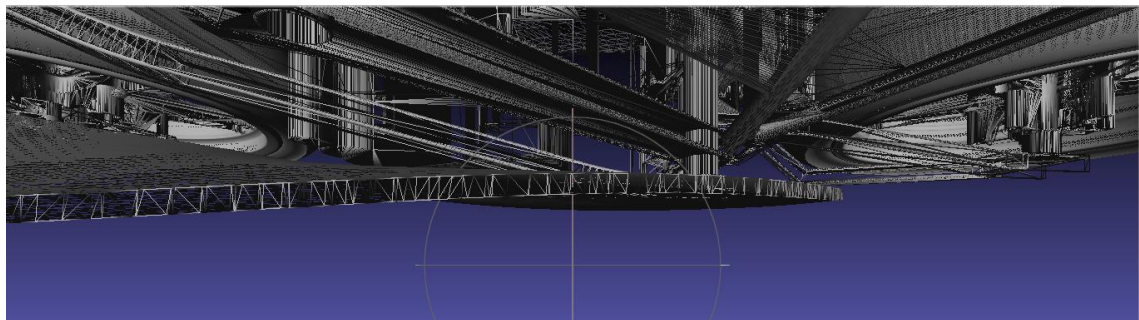


Figura 6.7: Malla del carenado visto en planta

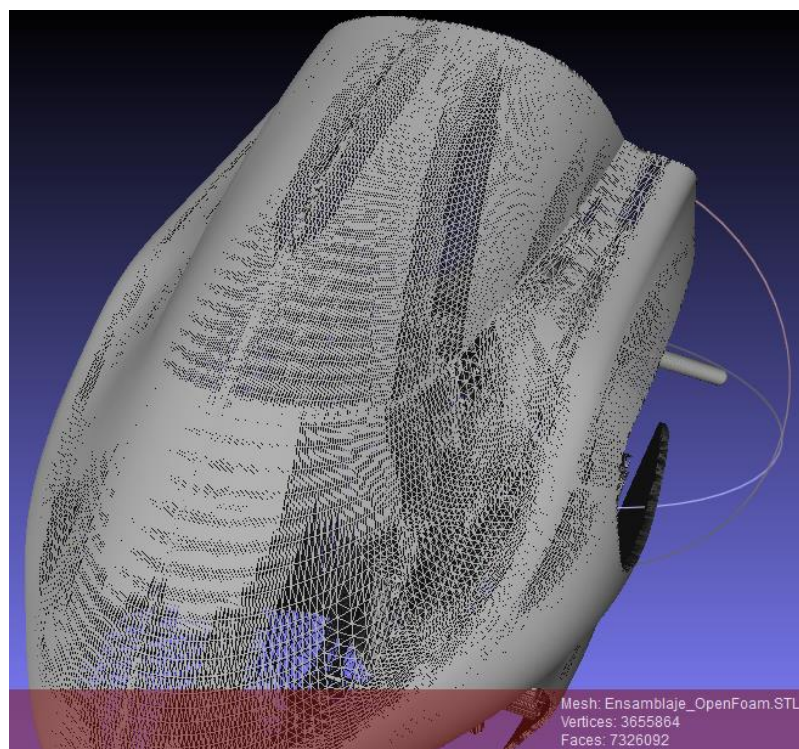


Figura 6.8: Malla en la zona frontal

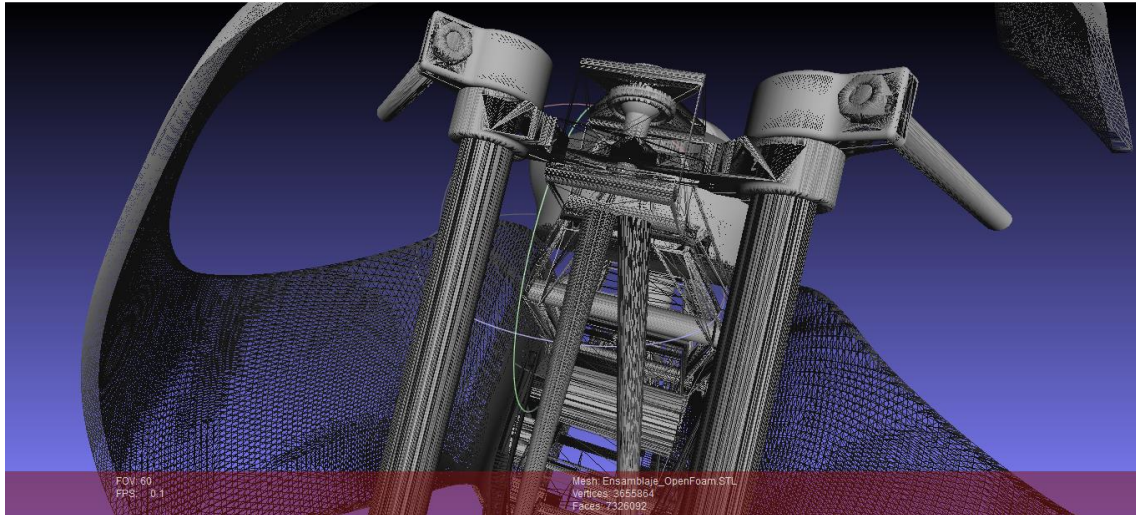


Figura 6.9: Malla de la horquilla delantera y carenado

Una vez realizado el tratamiento oportuno de la malla mediante la limpieza por filtrado (eliminación de duplicados, vértices, caras nulas, eliminación de pequeños componentes aislados, llenado automático de agujeros) y el remallado, el archivo primitivo .STL importado es ahora exportado con la extensión .OBJ.

El formato de archivo OBJ es un formato de datos simple que representa solamente la geometría 3D e incluye solo la posición de cada vértice, la posición UV (el mapeado UV es una manera de mapear texturas de tipo imagen sobre modelos tridimensionales. Se puede usar para aplicar texturas a formas arbitrarias y complejas como cabezas humanas o animales) de cada vértice de coordenadas de texturas, las normales y las caras que componen cada polígono definido como lista de vértices, y los vértices de texturas. De manera predeterminada, los vértices se guardan en el sentido contrario a las agujas del reloj, con lo cual la declaración explícita de las normales es innecesaria.

c) Mallador “blockMesh”

La malla se genera a partir de un archivo de diccionario llamado blockMeshDict ubicado en el directorio constante/Polymesh del caso en estudio. BlockMesh lee este diccionario, genera una malla hexaédrica estructurada y escribe los datos de la malla en los ficheros puntos y caras, y los archivos celdillas y condiciones de contorno en el mismo directorio.

El principio detrás de blockMesh es descomponer el dominio geométrico en bloques hexaédricos (en nuestro caso es suficiente con un único bloque que definiría el espacio geométrico ocupado por el túnel de viento). Los bordes de los bloques pueden ser líneas rectas, arcos o splines. La malla se especifica aparentemente como un número de celdillas en cada dirección del bloque, información suficiente para blockMesh para generar los datos de la malla.

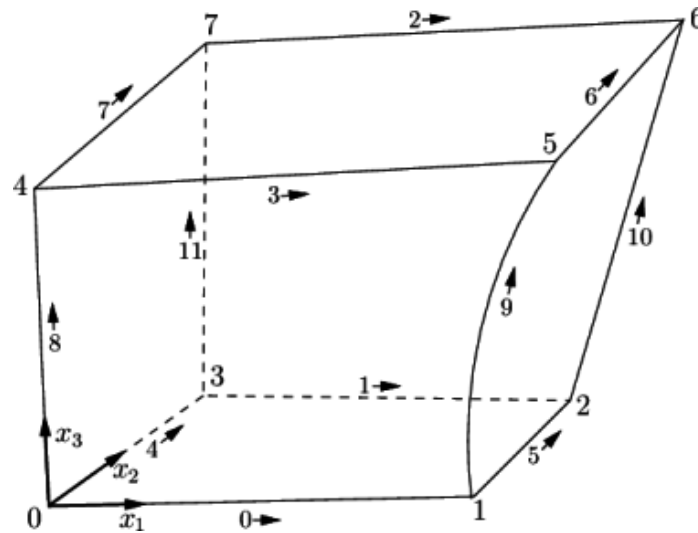


Figura 6.10: Bloque ejemplo

Cada bloque de la geometría se define por 8 vértices, uno en cada esquina de un hexaedro. Los vértices están escritos en una lista para que cada vértice se puede acceder usando su etiqueta, en OpenFOAM el primer elemento de la lista tiene siempre la etiqueta "0".

Para no interferir en los resultados y captar la estela de forma apropiada se requiere definir un bloque de amplias dimensiones (20x8x8m).

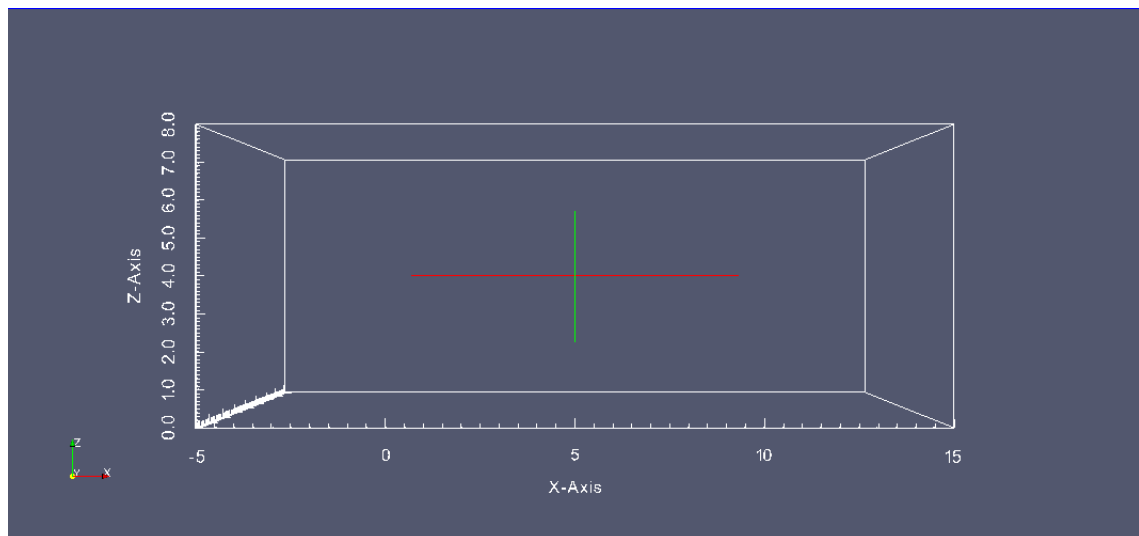


Figura 6.11: Plano XZ del bloque (supuesto túnel de viento)

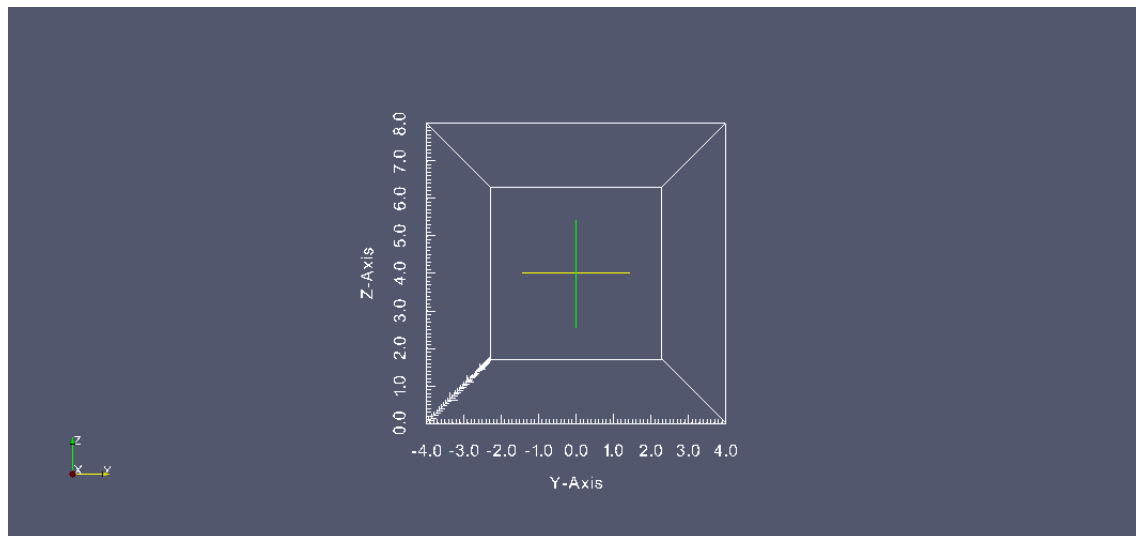


Figura 6.12: Plano YZ del bloque (supuesto túnel de viento)

Una vez que se lleva a cabo el mallado del bloque este queda dividido en celdillas de dimensión 1x1x1m, tamaño de celdillas que serán consideradas de nivel 0, a la hora de llevar a cabo el mallado posterior con snappyHexMesh.

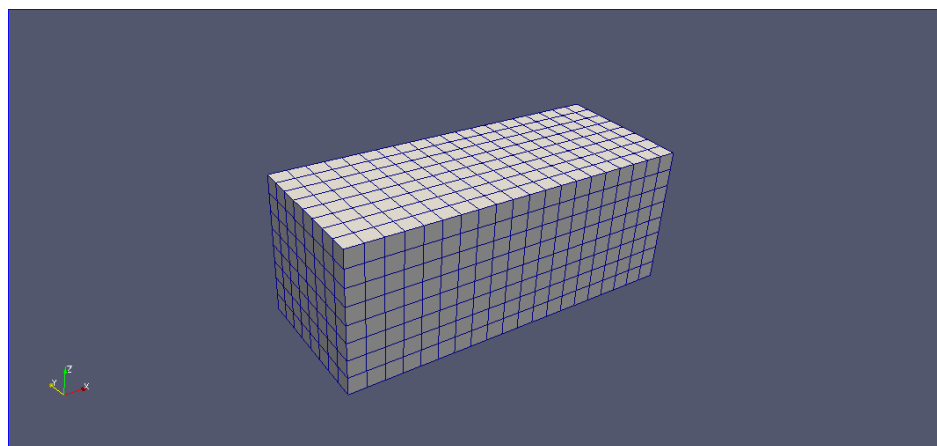


Figura 6.13: División en celdillas de 1x1x1m de nuestro bloque

Aunque este tipo de mallado es basto, esto no supone ningún inconveniente, dado que, la región de verdadero interés en el estudio es solo una pequeña zona dentro de nuestro bloque, donde se definirá un mallado mucho más tupido mediante snappyHexMesh.

d) Mallador “snappyHexMesh”

Antes de ejecutar el mallador, se debe comprobar la ubicación de la geometría de nuestro ensamblaje dentro del bloque definido anteriormente.

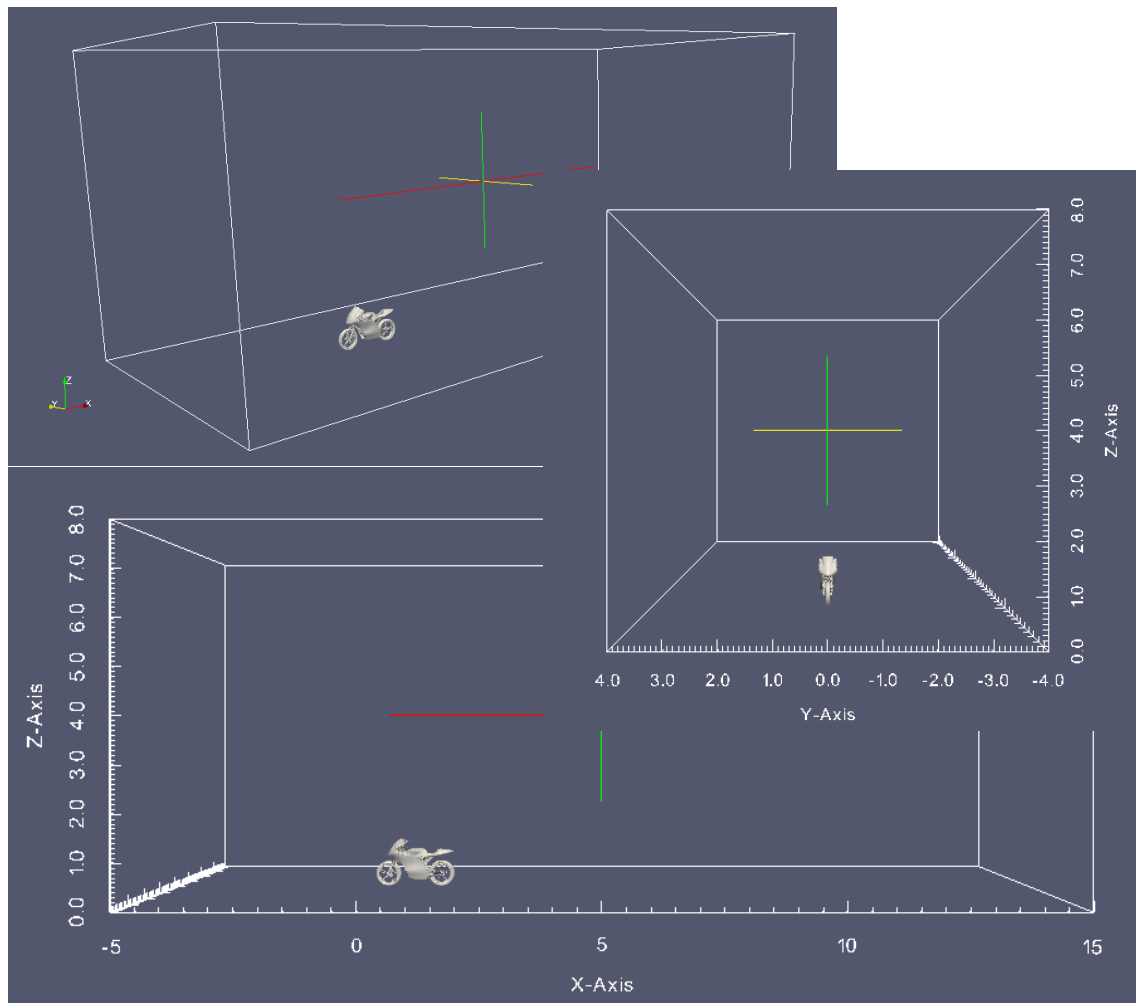


Figura 6.14: Posicionamiento de la motocicleta dentro del bloque.

En las imágenes anteriores se puede apreciar como el punto de origen de referencia de la geometría comentado anteriormente se encuentra localizado en el punto (0, 0, 0) de nuestro bloque.

La utilidad snappyHexMesh genera mallas tridimensionales que contienen hexaedros y fracción de hexaedros automáticamente a partir de geometrías de superficies trianguladas en formato estereolitografía (.STL), o mediante condiciones de contorno que limitan las entidades geométricas en OpenFOAM.

El objetivo es una región en forma de malla rectangular (sombreado en gris en la figura) que rodee el objeto y la superficie descrita por STL.

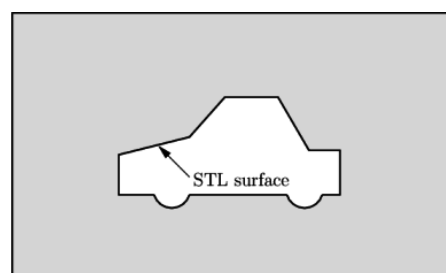


Figura 6.15: Esquema en 2D para el mallado con snappyHexMesh.

Al ejecutar la utilidad blockMesh se crea una malla de fondo de las celdillas hexaédricas que llena toda la región (debe existir al menos una intersección de un borde de una celdilla con la superficie STL, es decir, una malla de una sola celdilla no funcionará).

Las celdas deben estar cerca de la Relación de Aspecto unidad para el comportamiento óptimo.

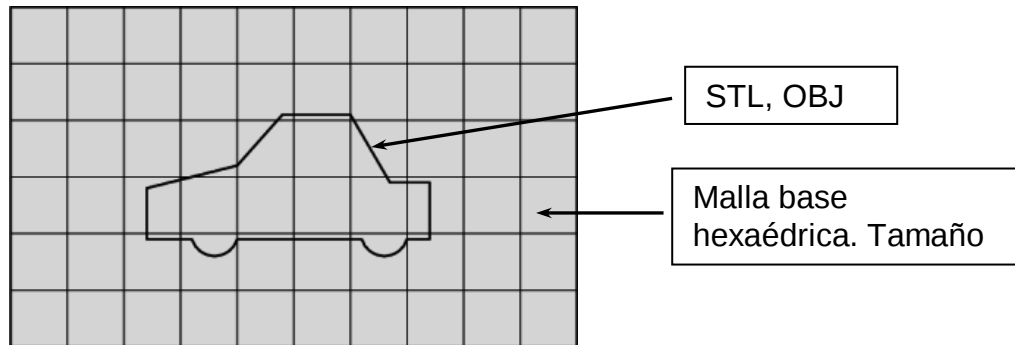


Figura 6.16: Generación de la malla inicial.

Ahora se lleva a cabo el refinamiento de la malla base. La división celular y el nivel de refinamiento se realizan de acuerdo a la especificación suministrada por el usuario en el subdiccionario castellatedMeshControls en snappyHexMeshDict.

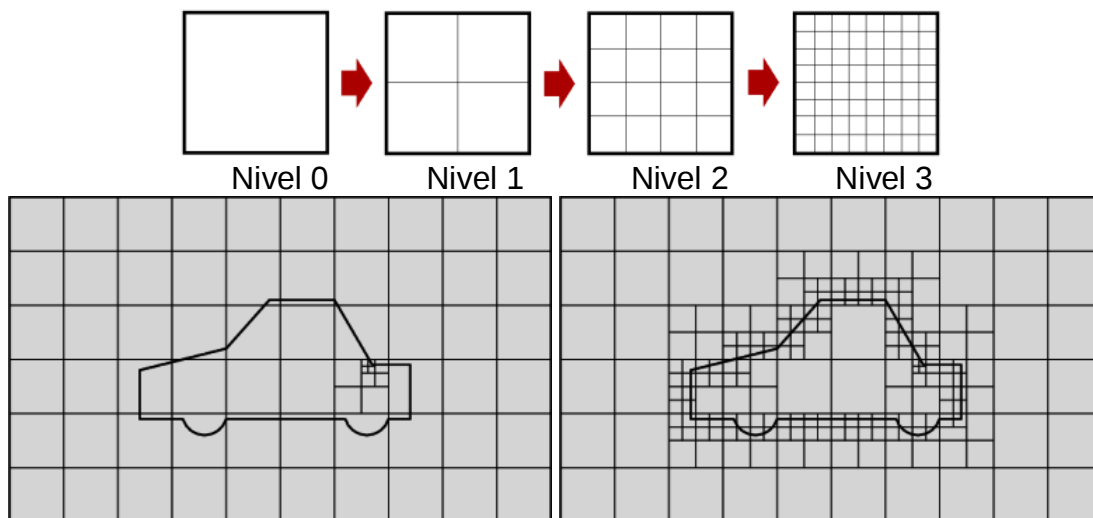


Figura 6.17: División de las celdillas en la superficie.

El proceso de separación comienza con las celdillas primero de dentro del dominio. Las células se mantienen si, hablando aproximadamente, 50% o más de su volumen se encuentra dentro de la región. Las células restantes se retiran en consecuencia.

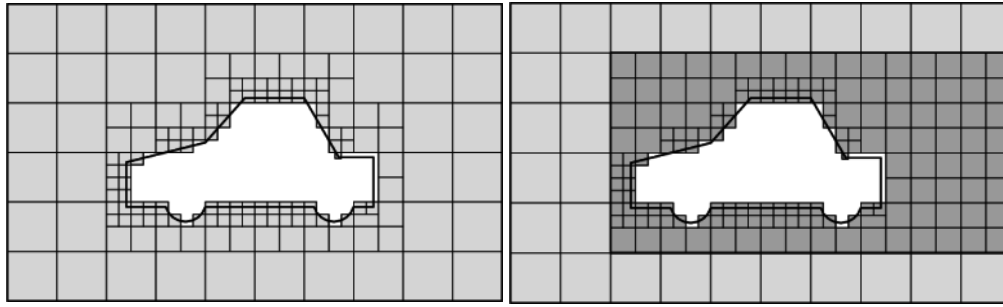


Figura 6.18: Eliminación y División de las celdillas de la región.

En la siguiente etapa del proceso de mallado consiste en mover los puntos de los vértices de las celdillas sobre geometría de la superficie para eliminar la superficie irregular de la malla. El proceso consiste en:

1. Desplazar los vértices del contorno sobre la superficie STL.
2. Resolver para la relajación de la malla interna con los últimos vértices desplazados.
3. Encontrar los vértices que causan que los parámetros de calidad de malla sea defectuosa.
4. Reducir el desplazamiento de los vértices de su valor inicial (paso 1) y repetir desde el segundo paso hasta que la calidad de la malla sea satisfecha.

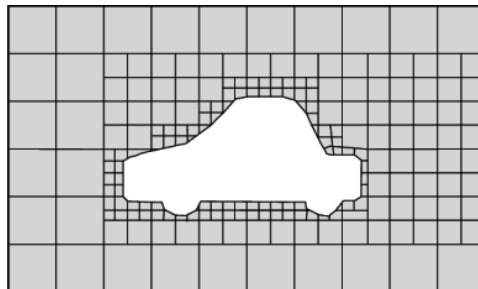


Figura 6.19: Mallado después de desplazar los vértices.

Veamos cómo finalmente ha quedado definida nuestra malla después de la ejecución de la utilidad snappyHexMesh.

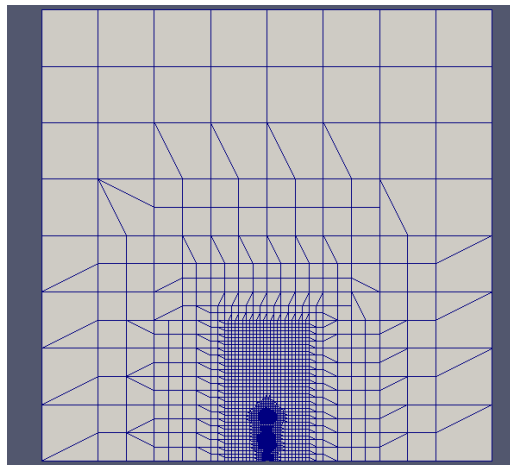


Figura 6.20: Mallado resultante final (en el plano YZ)

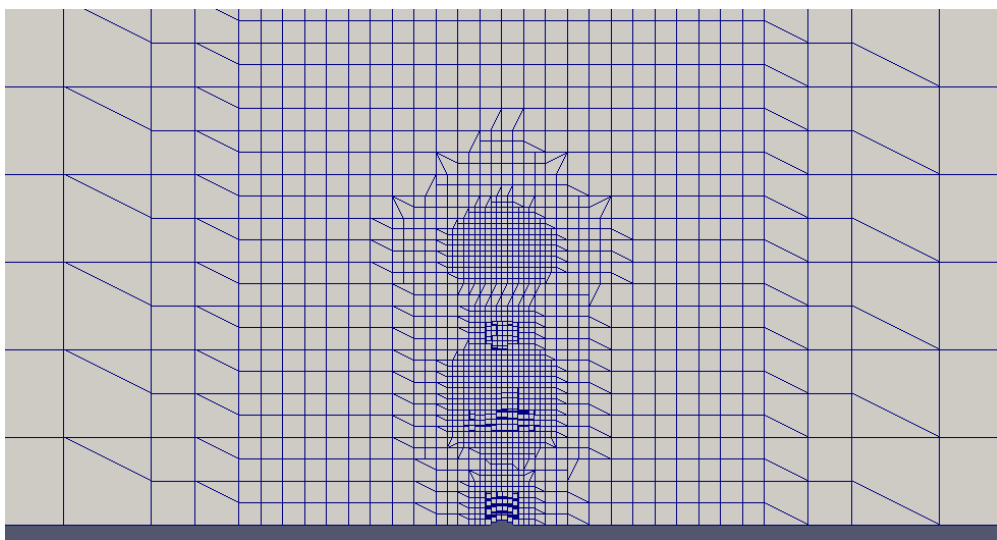


Figura 6.21: Zoom del mallado resultante final (en el plano YZ).

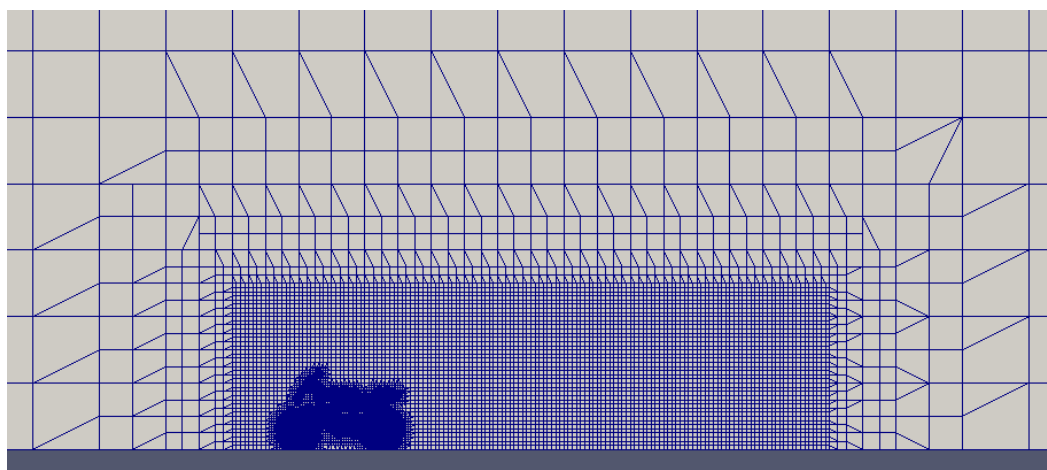


Figura 6.22: Mallado resultante final (en el plano XZ).

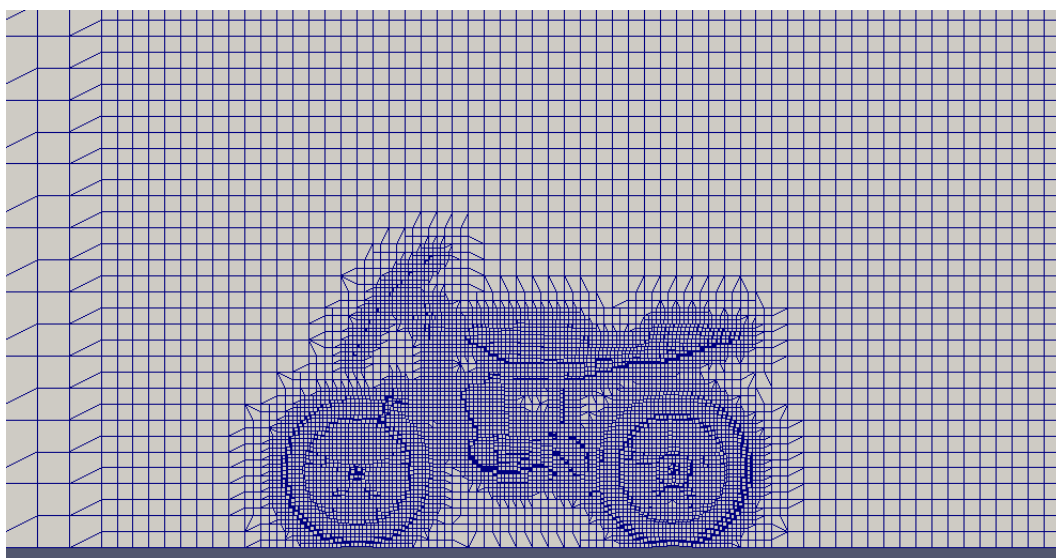


Figura 6.23: Zoom del mallado resultante final (en el plano XZ)

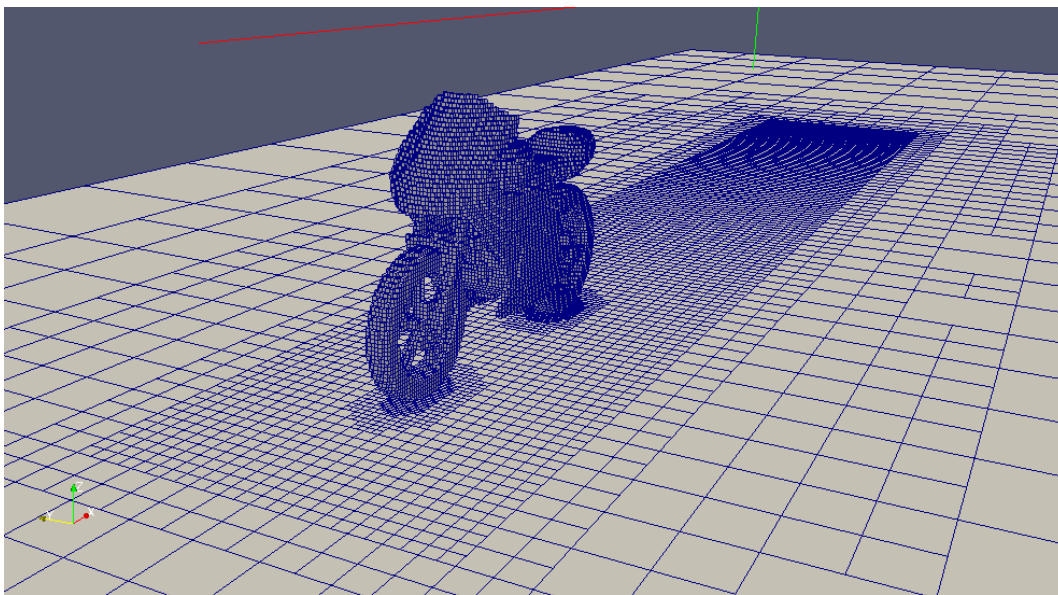


Figura 6.24: Malla del contorno de la superficie geométrica (3D)

Para llevar a cabo el estudio de convergencia se empleó el valor de y^+ en la pared, lo que nos dio una idea del refinamiento de malla necesario. Se realizaron cambios de dominio y de resolución de malla y no se presentaron cambios significativos aumentando el coste computacional de forma importante. Aunque físicamente cumple para lograr una adaptación, una buena simulación requeriría una malla más fina y unos residuales menores.

6.3 simpleFoam

Es el solver que se encarga de resolver las ecuaciones que gobiernan el fenómeno físico. Cada solver tiene unas características concretas, este se utiliza para llevar a cabo la simulación en estado estacionario en el caso de un flujo turbulento (KOmegaSST), newtoniano e incompresible.

Este solver para llevar a cabo la aproximación de los flujos turbulentos, utiliza los modelos RAS, también conocidos como RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations), basados en la media temporal de Reynolds.

6.4 Post-procesado

La principal herramienta de post-procesamiento proporcionada con OpenFOAM es un módulo lector para funcionar con ParaView, aplicación de visualización de código abierto.

El caso en estudio se controla desde el panel de la izquierda, que contiene lo siguiente:

- Pipeline Browser: enumera los módulos abiertos en ParaView, donde los módulos seleccionados se resaltan en azul y los gráficos para el módulo dado se puede activar/desactivar haciendo clic en el botón al lado del ojo.

- Panel de propiedades: contiene las selecciones de entrada para el caso, como es el paso de tiempo, regiones y campos.
- Panel de visualización: controla la representación visual del módulo seleccionado, por ejemplo, colores.
- Panel de información: da estadísticas de casos como la geometría y el tamaño de malla.

Un punto fuerte de ParaView es que el usuario puede crear un número de sub-módulos y mostrar solo los que les interese para crear la imagen o la animación deseada. Por ejemplo, es posible añadir alguna geometría sólida, malla y vectores velocidad, o un gráfico de contorno de presión...

7 Resultados

7.1 Coeficiente de arrastre, Drag

Es una fuerza aerodinámica que actúa opuesta al movimiento relativo del cualquier objeto que se mueve con respecto a un fluido circundante.

La ecuación de cantidad de movimiento del flujo nos proporcionará la fuerza de resistencia sobre un cuerpo, que luego reduciremos al coeficiente de dicha fuerza basándonos en el análisis dimensional. El coeficiente de resistencia quedará finalmente determinado a partir de los perfiles de velocidades de la estela del cuerpo, de forma que el problema habrá quedado reducido a la medida de dicho perfil de velocidades.

El estudio del problema se aborda imponiendo las siguientes hipótesis:

- flujo estacionario.
- flujo bidimensional.
- flujo incompresible.

7.1.1 Resistencia de un cuerpo bidimensional

La resistencia aerodinámica de un cuerpo inmerso en una corriente fluida puede deducirse a partir de la ecuación integral de cantidad de movimiento del flujo, la cual puede expresarse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\int_{V_c(t)} \rho \vec{v} dV \right] + \int_{\Sigma_c(t)} \rho \vec{v} [(\vec{v} - \vec{v}_c) \cdot \vec{n}] d\sigma = - \int_{\Sigma_c(t)} P \vec{n} d\sigma \\ + \int_{\Sigma_c(t)} \vec{\tau} \cdot \vec{n} d\sigma + \int_{V_c(t)} \rho \vec{f}_m dV \quad [7.1] \end{aligned}$$

Ecuación que expresa matemáticamente como el incremento por unidad de tiempo de la cantidad de movimiento que hay en el volumen de control es igual a la suma del flujo convectivo de la cantidad de movimiento que entra en el volumen de control a través de sus paredes $-\int_{\Sigma_c(t)} \rho \vec{v} [(\vec{v} - \vec{v}_c) \cdot \vec{n}] d\sigma$, la resultante de las fuerzas de superficie como son las fuerzas de presión, $-\int_{\Sigma_c(t)} P \vec{n} d\sigma$, y fuerzas de viscosidad $\int_{\Sigma_c(t)} \vec{\tau} \cdot \vec{n} d\sigma$, y la resultante de las fuerzas másicas $\int_{V_c(t)} \rho \vec{f}_m dV$ (en nuestro caso la única fuerza másica que actúa es la fuerza de la gravedad). Es conveniente recalcar que la ecuación de la cantidad de movimiento es una ecuación vectorial, da lugar a tres ecuaciones, una para cada componente de la velocidad.

Para flujos estacionarios el término de variación temporal $\left(\frac{d}{dt}\right)$ se anula, además por otro lado, puede prescindirse del término gravitatorio, dado que, al ser el fluido aire se puede despreciar frente a los demás términos. En consecuencia la ecuación anterior queda reducida a:

$$\int_{\Sigma_c} \rho \vec{v} [(\vec{v} - \vec{v}_c) \cdot \vec{n}] d\sigma = - \int_{\Sigma_c} p \vec{n} d\sigma + \int_{\Sigma_c} \vec{\tau} \cdot \vec{n} d\sigma \quad [7.2]$$

Donde ρ es la densidad del aire, $\vec{v}$ la velocidad del flujo, $\vec{n}$ vector normal a la superficie $d\sigma$, p la presión sobre la superficie en cuestión y $\vec{\tau}$ el tensor de esfuerzos viscosos.

El planteamiento del problema que tratamos de estudiar conlleva aplicar la ecuación [ec.7.2] a un volumen de control tal y como se muestra a continuación

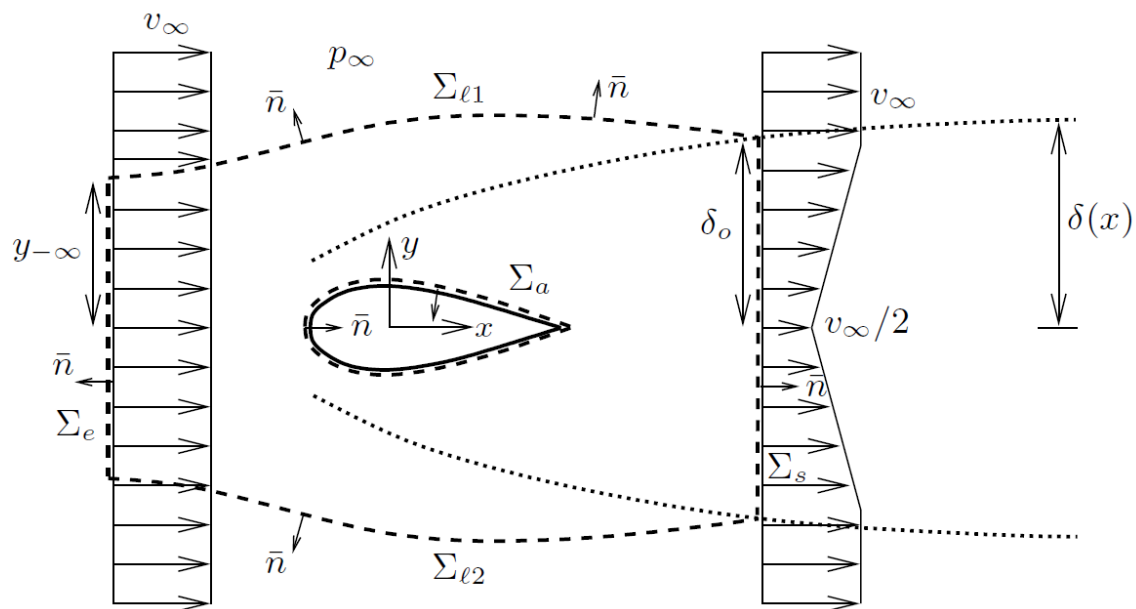


Figura 7.1: Volumen de control utilizado en el análisis del flujo alrededor de un ala.

Esta figura muestra el flujo bidimensional alrededor de un perfil aerodinámico bidimensional inmerso en una corriente uniforme, de forma que la corriente aguas arriba del perfil no ha sido perturbada y está caracterizada por una velocidad v_∞ y una presión uniforme del aire p_∞ . El flujo es perturbado por la presencia del ala, de forma que las líneas de corriente exteriores se abren, y aguas abajo del cuerpo se tiene un flujo con velocidad $v(x,y)$, que indica que la velocidad ya no es uniforme si no que existe un déficit de velocidad en la zona correspondiente a la estela que se genera aguas abajo, con una distribución de velocidades dada por $v(x,y)$, esto significa que en cada sección x posterior al perfil la velocidad depende de la ordenada y . En los extremos superior e inferior, a una distancia suficientemente grande como

para que los efectos de la estela no se noten, la velocidad recobra el valor de la corriente sin perturbar.

La ecuación de continuidad para el problema plano que nos ocupa vendrá dada por:

$$\frac{d}{dt} \left[\int_{V_c(t)} \rho dV \right] + \int_{\Sigma_c(t)} \rho [(\vec{v} - \vec{v}_c) \cdot \vec{n}] d\sigma = 0 \quad [7.3]$$

El flujo convectivo de masa a través de la superficie de control es distinto de cero solo en las superficies Σ_e de entrada Σ_s y de salida. En la superficie del álabes Σ_a la velocidad del fluido es nula $\vec{v}=0$, en virtud de la condición de adherencia; y en las superficies de corriente Σ_{l_1} y Σ_{l_2} , la componente normal de la velocidad es cero, $\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$, por la propia definición de superficie de corriente. Con estas consideraciones y teniendo en cuenta que en el sistema de control fijo ($\vec{v}_c=0$) elegido el flujo es estacionario, la [ec.7.3] se simplifica para dar:

$$\int_{\Sigma_e} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma + \int_{\Sigma_s} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma = 0 \quad [7.4]$$

Del resultado de aplicar la ecuación [ec.7.2] a nuestro volumen de control fijo ($\vec{v}_c=0$) queda la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \int_{\Sigma_e} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma + \int_{\Sigma_s} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma = & - \int_{\Sigma_e + \Sigma_{l_1} + \Sigma_{l_2} + \Sigma_s} p \vec{n} d\sigma - \int_{\Sigma_a} p \vec{n} d\sigma \\ & + \int_{\Sigma_e + \Sigma_{l_1} + \Sigma_{l_2} + \Sigma_s} \vec{\tau} \cdot \vec{n} d\sigma + \int_{\Sigma_a} \vec{\tau} \cdot \vec{n} d\sigma \end{aligned} \quad [7.5]$$

El término de flujo convectivo de cantidad de movimiento es distinto de cero solamente en las superficies Σ_e de entrada y Σ_s de salida.

Supondremos dos simplificaciones, que pueden aplicarse de forma aproximada a nuestro análisis. Por un lado, en el caso de altos números de Reynolds, los esfuerzos viscosos son despreciables en la estela y a lo largo de las superficies de corriente laterales. Como además, los esfuerzos viscosos son nulos aguas arriba, por ser el perfil de velocidad uniforme, podemos escribir:

$$\int_{\Sigma_e + \Sigma_{l_1} + \Sigma_{l_2} + \Sigma_s} \vec{\tau} \cdot \vec{n} d\sigma = 0 \quad [7.6]$$

Por otro lado si se elige el volumen de control suficientemente grande, las diferencias de presión $p - p_\infty$ son despreciables en todo el contorno exterior del volumen de control, con lo que, por tratarse de la resultante de una distribución uniforme de presión sobre una superficie cerrada:

$$\int_{\Sigma_e + \Sigma_{l_1} + \Sigma_{l_2} + \Sigma_s} p \vec{n} d\sigma = \int_{\Sigma_e + \Sigma_{l_1} + \Sigma_{l_2} + \Sigma_s} p_\infty \vec{n} d\sigma = 0 \quad [7.7]$$

Con todo ello, la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento se reduce a:

$$\int_{\Sigma_e} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma + \int_{\Sigma_s} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma = - \int_{\Sigma_a} p \vec{n} d\sigma + \int_{\Sigma_a} \vec{\tau} \cdot \vec{n} d\sigma \quad [7.8]$$

Teniendo en cuenta que en los términos de la derecha el vector normal $\vec{n}$ apunta hacia el interior del perfil, podemos concluir que el segundo miembro de [ec.x.8] representa la fuerza que el perfil ejerce sobre el fluido, que por la ley de acción y reacción es igual y de sentido contrario a la fuerza que el fluido ejerce sobre el perfil.

$$\int_{\Sigma_e} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma + \int_{\Sigma_s} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma = -F_{\text{fluido} \rightarrow \text{álabe}} \quad [7.9]$$

Nótese que, por la simetría de la configuración, esta ecuación vectorial solo tiene componente x:

$$\int_{\Sigma_e} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma + \int_{\Sigma_s} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma = -F_x \quad [7.10]$$

Como se observa, es la diferencia entre el flujo convectivo de cantidad de movimiento aguas arriba y aguas abajo del perfil lo que da lugar a la fuerza de resistencia.

Las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento puede reescribirse en función de la coordenada y de la estela como:

$$- \int_{\Sigma_e} \rho v_\infty dy + \int_{\Sigma_s} \rho u dy = 0 \quad [7.11]$$

$$D = \int_{\Sigma_e} \rho v_\infty^2 dy - \int_{\Sigma_s} \rho u^2 dy \quad [7.12]$$

Multiplicando la [ec.7.11] por v_∞ se obtiene:

$$\int_{\Sigma_e} \rho v_\infty^2 dy = \int_{\Sigma_s} \rho v_\infty u dy \quad [7.13]$$

Finalmente la expresión de la resistencia aerodinámica D por unidad de longitud (problema bidimensional), se obtendrá sustituyendo la [ec.x.13] en la [ec.7.11]:

$$D = \int_{\Sigma_s} \rho u (v_\infty - u) dy \quad [7.14]$$

Lo que nos indica que la fuerza de resistencia aerodinámica es igual al defecto de cantidad de movimiento en la estela del objeto.

El desarrollo aun habiendo sido realizado para un perfil, es perfectamente válido para cualquier otro cuerpo bidimensional que mantenga una simetría respecto al eje x.

7.1.2 Análisis dimensional

El análisis dimensional de las ecuaciones fundamentales que gobiernan nuestro problema es de gran interés, pues constituye una herramienta que permite reducir problemas físicos complejos a su forma más simple posible antes de tratar de buscar respuestas cuantitativas. De modo que permite reducir el número de ensayos, ayuda a planificar el experimento, y proporciona las leyes de escala que pueden convertir los datos obtenidos sobre un pequeño modelo en información para el diseño de un prototipo a escala real.

Como en cualquier análisis dimensional lo primero que hay que identificar son las n variables relevantes, y es que la fuerza D sobre un cuerpo sumergido en un fluido es función de la longitud característica (L) del cuerpo, de la velocidad del flujo (v_∞), de la densidad (ρ) y viscosidad del fluido (μ), de forma que puede expresarse como:

$$D = \phi(L, v_\infty, \rho, \mu) \quad [7.15]$$

La matriz dimensional queda de la siguiente manera:

	D	L	v_∞	ρ	μ
M	1	0	0	1	1
L	1	1	1	-3	-1
T	-2	0	-1	0	-1

en esta matriz las cinco variables que intervienen en el análisis se ponen en función de las dimensiones fundamentales (k): longitud L, masa M y tiempo T. De acuerdo con el teorema de Π el número de grupos adimensionales (m) es el número de variables relevantes (n) menos el número de dimensionales fundamentales (k), de modo que $m=n-k=4-3=1$.

Seleccionando como variables independientes los dimensionales L, v_∞ y ρ , los dos grupos adimensionales (Π_0 y Π_1) resultantes serán:

$$\Pi_0 = DL^a v_\infty^b \rho^c \quad ; \quad \Pi_1 = \mu L^a v_\infty^b \rho^c \quad [7.16]$$

Adimensionales que pueden ser calculados mediante un sistema de ecuaciones:

- 1º Adimensional.

$$M^0 L^0 T^0 = M^1 L^1 T^{-2} [L]^a [LT^{-1}]^b [ML^{-3}]^c \quad [7.17]$$

$$\begin{cases} M^0 = M^{1+c} \\ L^0 = L^{1+a+b-3c} \\ T^0 = T^{-2-b} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} 0 = 1 + c \rightarrow c = -1 \\ 0 = 1 + a + b - 3c \rightarrow a = -2 \\ 0 = -2 - b \rightarrow b = -2 \end{cases}$$

$$\Pi_0 = \frac{D}{\rho v_\infty^2 L^2} \quad [7.18]$$

- 2º Adimensional.

$$M^0 L^0 T^0 = M^1 L^1 T^{-1} [L]^a [LT^{-1}]^b [ML^{-3}]^c$$

$$\begin{cases} M^0 = M^{1+c} \\ L^0 = L^{1+a+b-3c} \\ T^0 = T^{-1-b} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} 0 = 1 + c \rightarrow c = -1 \\ 0 = 1 + a + b - 3c \rightarrow a = -1 \\ 0 = -1 - b \rightarrow b = -1 \end{cases}$$

$$\Pi_1 = \frac{\mu}{\rho v_\infty L} \rightarrow \frac{\rho v_\infty L}{\mu} = Re \quad [7.19]$$

Luego finalmente se obtiene que:

$$\Pi_0 = \phi(\Pi_1) \rightarrow \frac{D}{\rho v_\infty^2 L^2} = \phi(Re) \quad [7.20]$$

Análogamente puede expresarse como un coeficiente de fuerza de la forma:

$$C_F = \phi(Re) \quad [7.21]$$

donde Re es el número de Reynolds, el cual representa la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas y $\phi(Re)$ es una función del número de Reynolds que se determina experimentalmente.

Como en este caso el coeficiente de fuerza depende únicamente del Re, para que exista semejanza, el número de Reynolds deberá ser el mismo para modelo y prototipo. De esta forma se dará que los coeficientes de fuerza para modelo y prototipo son iguales.

- Existirá semejanza dinámica porque las fuerzas en modelo y prototipo guardan la misma proporción.
- La semejanza geométrica impondrá que todas las dimensiones espaciales en las tres coordenadas tengan la misma relación de escala.
- La semejanza cinemática impondrá que dos partículas homólogas habrán de pasar por puntos homólogos en instantes homólogos.

7.1.3 Coeficiente de resistencia

De acuerdo con el análisis dimensional realizado en el apartado anterior resulta interesante definir un coeficiente de resistencia aerodinámica C_D , de forma que los datos obtenidos sobre un pequeño modelo puedan convertirse en datos para el diseño de cuerpos a escala real, hecho que justifica los experimentos en túnel.

Como ya se ha afirmado anteriormente la fuerza de resistencia D en un problema bidimensional es una fuerza por unidad de longitud, cuyas dimensiones son, $[D]=[MT^{-2}]$. De forma habitual se adimensionaliza con el producto $q_\infty \cdot L$, donde q_∞ es la presión dinámica dada por la expresión:

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 \quad [7.22]$$

$$q_\infty = [ML^{-3}][L^2T^{-2}] = [ML^{-1}T^{-2}] \quad [7.23]$$

El tamaño característico L tiene dimensiones de longitud ($[L]=[L]$), por lo que $[q_\infty \cdot L]=[MT^{-2}]$. El coeficiente adimensional C_D generalmente se expresa de la siguiente forma:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2 L} \quad [7.24]$$

De modo que, una ecuación análoga a la [ec.7.21] para la fuerza D quedaría como:

$$C_D = F(Re) \quad [7.25]$$

El coeficiente de resistencia aerodinámica depende únicamente del Re , de forma que para que exista semejanza el número de Reynolds deberá ser el mismo para modelo y prototipo, motivo que justifica la experimentación con modelos (pequeña escala) para obtener el C_D que será válido para cuerpo (escala real) siempre y cuando el Re se mantenga.

Sustituyendo la expresión [ec.7.14] en [ec.7.24], se obtiene una expresión de C_D en la forma:

$$C_D = \frac{2}{L} \int_{\Sigma_S} \frac{u}{v_\infty} \left(1 - \frac{u}{v_\infty}\right) dy \quad [7.26]$$

El problema ha quedado ahora planteado en términos de la determinación del coeficiente C_D , lo cual resulta mucho más útil.

7.1.3.1 Incógnitas del problema

Según la ecuación [ec.7.26] cuando un cuerpo bidimensional de longitud característica L se mueve en una corriente de velocidad v_∞ conocida, sólo nos queda por determinar la distribución de velocidades u en la estela y los límites de integración, todo lo cual conduce al conocimiento de C_D .

- *Límites de integración*

La integral se realiza entre unos límites tales que en sus extremos la corriente haya recuperado la velocidad de la corriente incidente sin perturbar, es decir, allí donde se cumpla que $u=v_\infty$. En esa situación nos encontraremos fuera de la estela, y el perfil de velocidades se habrá uniformizado, de forma que la presión también será la de la corriente sin perturbar.

- *Distribución de velocidades en la estela*

La distribución o perfil de velocidades $u(x,y)$ en la estela depende de las dos coordenadas x e y (problema bidimensional). La expresión [ec.7.26] nos indica que la integración se realiza en dirección perpendicular al avance del fluido (coordenada y), luego habrá que definir el valor de x , lo que equivale a definir la localización de la sección donde se calcula la integral [ec.7.26]. La posición x dependerá de cada cuerpo, pero en todo caso, deberá elegirse de forma que se cumplan los requisitos indicados en la exposición llevada a cabo en el apartado 7.1; lo cual lleva a la consideración de una estela lejana.

En resumen la determinación del coeficiente de resistencia C_D conlleva aplicar los pasos indicados a la hora de resolver la [ec.7.26].

7.1.3.2 Medida del C_D con PIV

Nuestra hipótesis de trabajo es que la determinación del coeficiente de resistencia puede obtenerse indirectamente a partir de las medidas experimentales de velocidad realizadas mediante la técnica PIV.

La expresión [ec.7.26] ha dejado patente que el conocimiento del coeficiente de resistencia es equivalente al conocimiento del perfil de velocidades $u(y)$ en la estela lejana del cuerpo. La técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) permite determinar el campo bidimensional de velocidades, por lo que resulta adecuada para resolver nuestro problema.

Las medidas de velocidad en la estela obtenidas con PIV forman un conjunto de datos discretos, no una función continua, por lo que la integral analítica no puede realizarse, y habrá que realizar una integración numérica; la integral de una función continua pasa a ser una suma de los datos discretos. Dicha integración numérica se puede realizar mediante un esquema trapezoidal.

7.1.4 Extensión del método

El método expuesto para cálculo del coeficiente de resistencia aerodinámica a partir de medidas de velocidad de PIV es perfectamente válido para una instalación mayor, tal como puede ser un túnel aerodinámico a escala industrial. Los problemas prácticos serán similares a los encontrados en el pequeño túnel en que se realizaron los experimentos de este trabajo.

- *Extensión al campo tridimensional*

La extensión al cálculo de estelas tridimensionales implicaría repetir el proceso expuesto para una serie de planos que cubriesen toda la zona de estela. De esta forma podría determinarse la resistencia de vehículos tales como automóviles, trenes, e incluso aviones.

Las modalidades tridimensionales de PIV, en su versión estereoscópica y holográfica están todavía en fase de laboratorio, pero en un futuro podrán aplicarse a instalaciones mayores.

- *Extensión a la medida de otras fuerzas*

La extensión a la medida de la fuerza en dirección perpendicular a la corriente incidente de flujo se consigue a partir de la ecuación de cantidad de movimiento en esa dirección, cuya expresión es análoga a [ec.7.9].

$$F_y = - \int_{\Sigma_e} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma - \int_{\Sigma_s} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\sigma \quad [7.27]$$

Cuando se ensayan cuerpos sustentadores, tales como perfiles aerodinámicos, la fuerza de sustentación teorema de Kutta-Joukowski. Este teorema afirma que la fuerza de sustentación F_L , de un perfil, viene dada por la expresión aerodinámica también puede ser medida aplicando el

$$F_L = \rho v_\infty \Gamma \quad [7.28]$$

donde Γ representa la circulación del vector velocidad.

7.1.5 Integración numérica de resultados

Para obtener el coeficiente de resistencia C_D a partir de los valores de velocidad medidos en la estela, habrá que realizar la integración dada por la expresión:

$$C_D = \frac{2}{Lv_\infty^2} \int_{-\infty}^{+\infty} u(v_\infty - u) dy = \frac{2}{Lv_\infty^2} \int_{-\infty}^{+\infty} u_1(v_\infty - u_1) dy \quad [7.29]$$

donde u_1 es el defecto de velocidad en la cavidad de la estela, es decir, la diferencia $v_\infty - u$.

Despreciando los términos en u_1^2 y teniendo en cuenta que fuera de los límites de la sección de salida Σ_s el valor de la velocidad u_1 es nulo:

$$C_D = \frac{2}{L} \int_{\Sigma_s} \frac{u_1}{v_\infty} dy \quad [7.30]$$

Dicho coeficiente deberá obtenerse por integración numérica de los datos discretos obtenidos en los ensayos. Para realizar dicha integración numérica existen varios métodos. Nosotros vamos a utilizar el denominado de los trapecios o regla trapezoidal para evaluar la función teórica y los datos experimentales de PIV.

Método de los trapecios o regla trapezoidal compuesta

La integral definida de una función genérica $f(x)$ se calcula como el área bajo la curva $f(x)$ entre los límites a y b de dicha integral. El área bajo la curva (figura 7.2) se puede dividir en n bandas de anchura h , de forma que se sustituyen los arcos de curva que limitan cada banda por la cuerda correspondiente, constituyendo cada banda un trapecio.

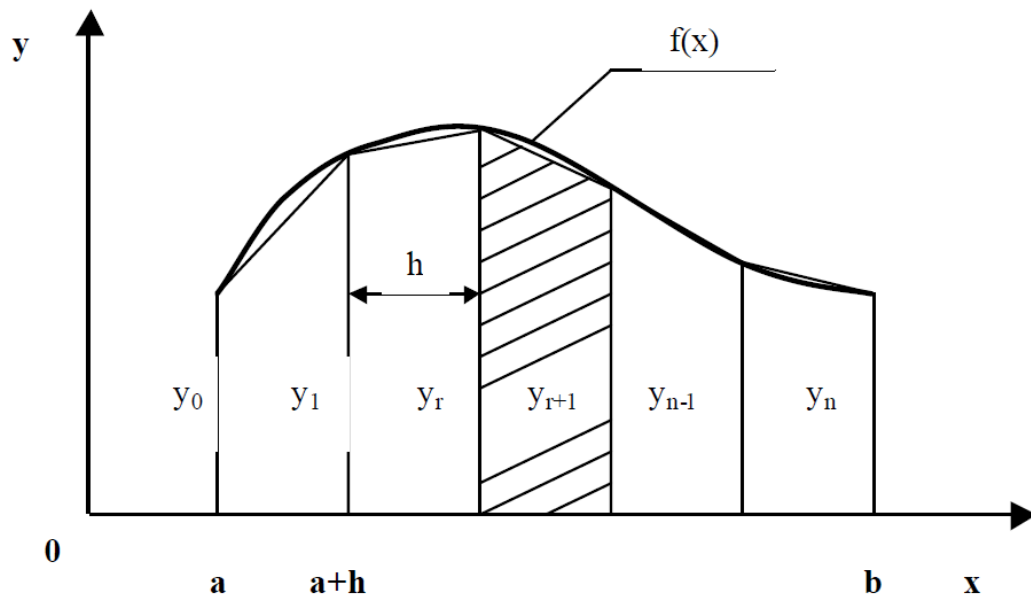


Figura 7.2: Esquema del método de los trapecios.

Si nos fijamos en el trapecio rayado de la figura 7.2, vemos que las ordenadas delimitantes son y_r e y_{r+1} , la anchura es h y la superficie del trapecio será:

$$S_{\text{trapecio}} = \frac{1}{2}(y_r + y_{r+1})h \quad [7.31]$$

La superficie (integral) cuya área tratamos de calcular estará formada por n trapecios de anchura h .

$$\begin{aligned} \int_{\Sigma_s} f(x)dx &\approx \frac{h}{2} \left(f(a) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(a + ih) + f(b) \right) \\ &= \frac{h}{2} (y_0 + 2y_1 + 2y_2 + \dots + y_n) \end{aligned} \quad [7.32]$$

El intervalo de discretizado espacial h viene dado por $h=(b-a)/n$, siendo n el número de intervalos en que se ha dividido $\overline{ab}$, y las condiciones de contorno de $y_i=f(x_i)$, son $y_0=f(a)$ e $y_n=f(b)$.

Aplicando la regla de los trapecios al cálculo del coeficiente de resistencia nos queda la expresión:

$$C_{D\text{trapecios}} = \frac{2h}{L} \left(\left(\frac{u_1}{v_\infty} \right)_0 + 2 \left(\frac{u_1}{v_\infty} \right)_1 + 2 \left(\frac{u_1}{v_\infty} \right)_2 + \dots + \left(\frac{u_1}{v_\infty} \right)_n \right) \quad [7.33]$$

7.1.6 Estelas y valores de C_D

Dado que un análisis tridimensional de la estela se escapa de nuestro alcance debido a la gran complejidad y especialmente laborioso del asunto, pues hasta ahora para poder llevar a cabo estos análisis se debe recurrir a la repetición del proceso para una serie de planos que cubran toda la zona de la estela, llevaremos a cabo un estudio bidimensional de las estelas.

En este apartado obtendremos el coeficiente C_D de acuerdo a la estela horizontal (plano XY paralelo al suelo del túnel a $z=162\text{mm}$) provocada por el carenado de la motocicleta, es decir, de acuerdo a las mediciones realizadas mediante el posicionamiento horizontal de la cámara y vertical del láser. Pues de esta forma, tendremos una geometría simétrica con respecto al eje x (como se observa en la figura 7.3), lo que conlleva a la anulación de la componente y de la velocidad, y la posibilidad de calcular la [ec.7.26].

$$C_D = \frac{2}{L} \int_{\Sigma_s} \frac{u}{v_\infty} \left(1 - \frac{u}{v_\infty} \right) dy \quad [7.34]$$



Figura 7.3: Apreciación de la simetría respecto al eje x.

También veremos la importancia de considerar una estela lo suficientemente alejada del objeto de estudio.

Tanto debido a errores de instrumentación y/o del propio observador en las mediciones (errores sistemáticos) como a fluctuaciones causadas por factores externos no controlados (errores aleatorios), se obtienen diferentes resultados al medir varias veces la misma magnitud. Para que el coeficiente de arrastre calculado se adapte a la solución real de la forma más certera posible, calcularemos el valor de dicho coeficiente para varias estelas a lo largo de la coordenada x de una misma imagen PIV y aplicaremos la media a los valores obtenidos entre la prueba 1 y 2.

Los datos de partida para la resolución de la [ec.7.34] son la longitud característica (ancho del carenado, $L=72$ mm) y la velocidad uniforme del flujo $v_{\infty}=25,6$ m/s (que no coincide con el valor de $v_{\infty}=24,26$ m/s obtenido en la calibración para el caso de 50 hz, debido a que surgió un imprevisto en esta último día de toma de mediciones para el cálculo de la estela y se desprendió una lámina de madera del túnel, Figura 7.4).



Figura 7.4: Desprendimiento de la lámina de madera.

Nota: este accidente solo afectó a la toma de mediciones tomadas a partir de ese momento, que solo fueron las obtenidas para el análisis de la estela. La diferencia en las velocidades se debe a que durante los días anteriores en dicha lámina existiría una pequeña apertura que permitiría la fuga de parte del flujo, lo cual dejó de ocurrir después de que el desperfecto se reparara.

De la matriz que conforma el campo de velocidad cada columna representa un perfil de velocidades de una estela, de modo que, de cada columna se puede deducir un valor del coeficiente de resistencia.

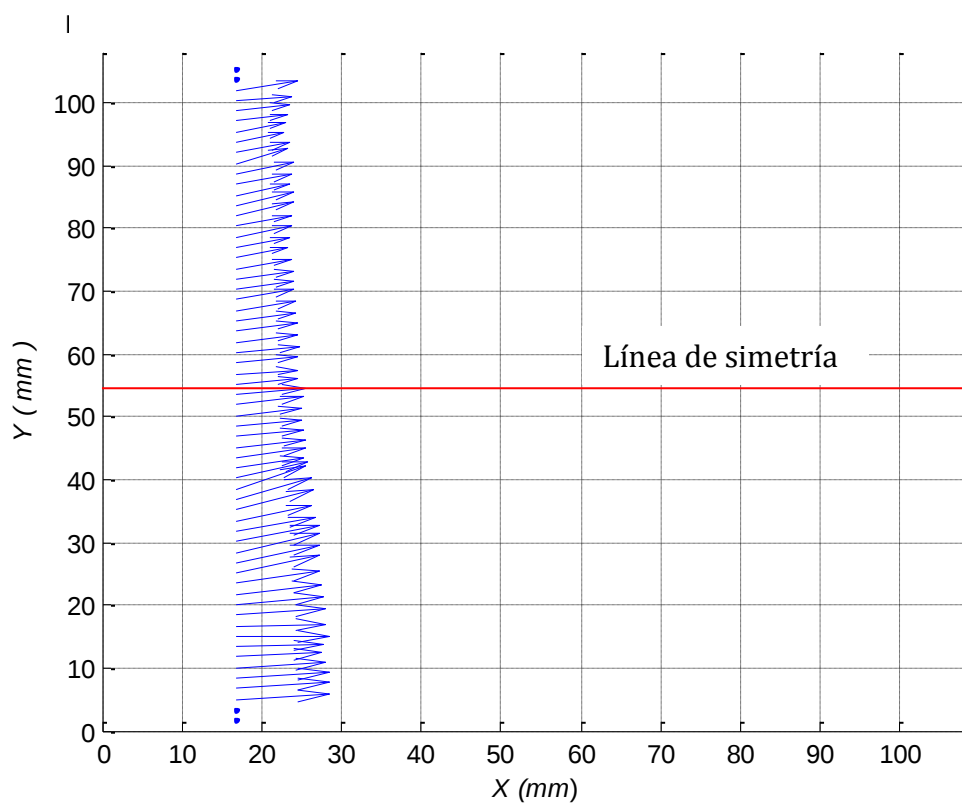
Se han llevado cabo las mediciones para tres planos imagen distintos (Posición A, B y C), y en cada uno se ha llevado a cabo dos pruebas, para de esta forma disponer de una población de muestras suficiente como para hacer posible el cálculo del coeficiente de resistencia mediante una media aritmética.

Para precisar la separación de la estela en estudio respecto a la moto se emplearán valores proporcionales a H (altura, 212 mm), que marcarán la distancia existente entre el punto final del colín (origen) y la distancia aguas abajo de la estela. El punto 0 en el eje x y el eje y de las siguientes gráficas marca el límite inferior izquierdo de los fotogramas tomados.

Veamos a modo de ejemplo dos estelas para cada uno de las pruebas efectuadas:

▪ Posición A de la cámara

Prueba 1



• **Figura 7.5: Estela a $0,75H$ para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,7166$**

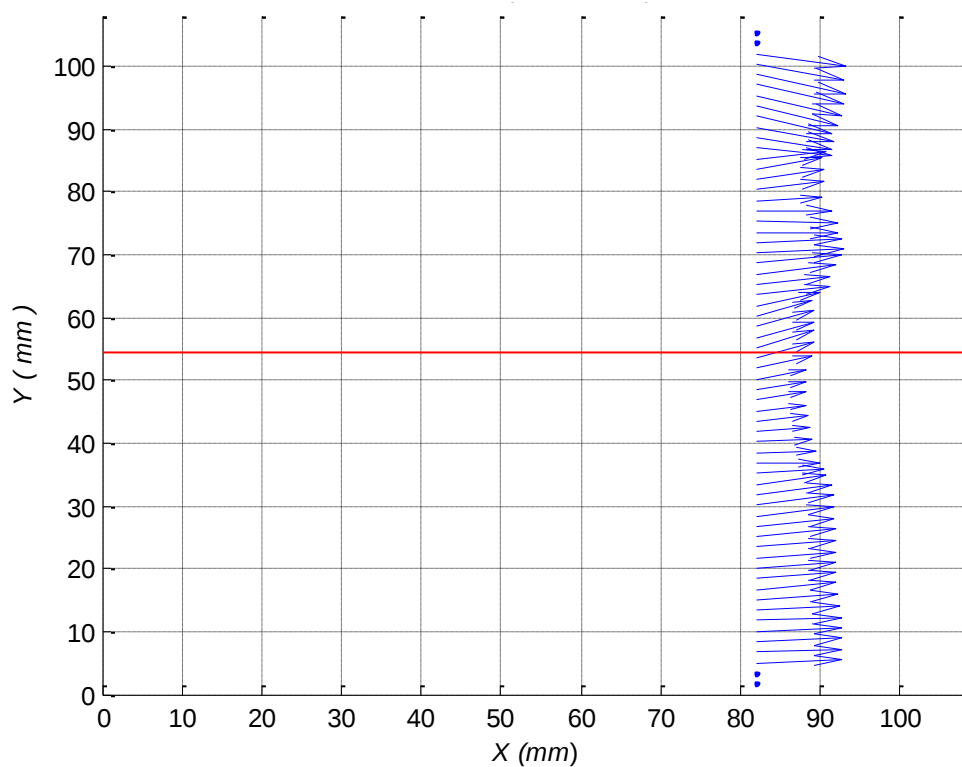


Figura 7.6: Estela a $1H$ para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,6194$

Prueba 2

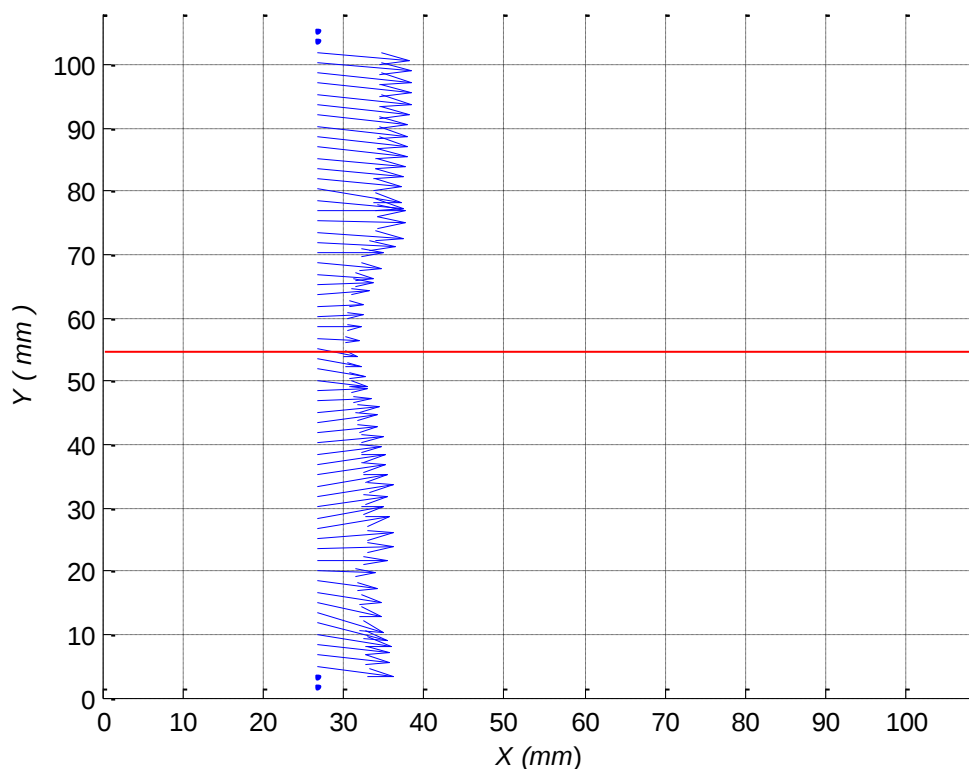


Figura 7.7: Estela a 0,9H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,6794$

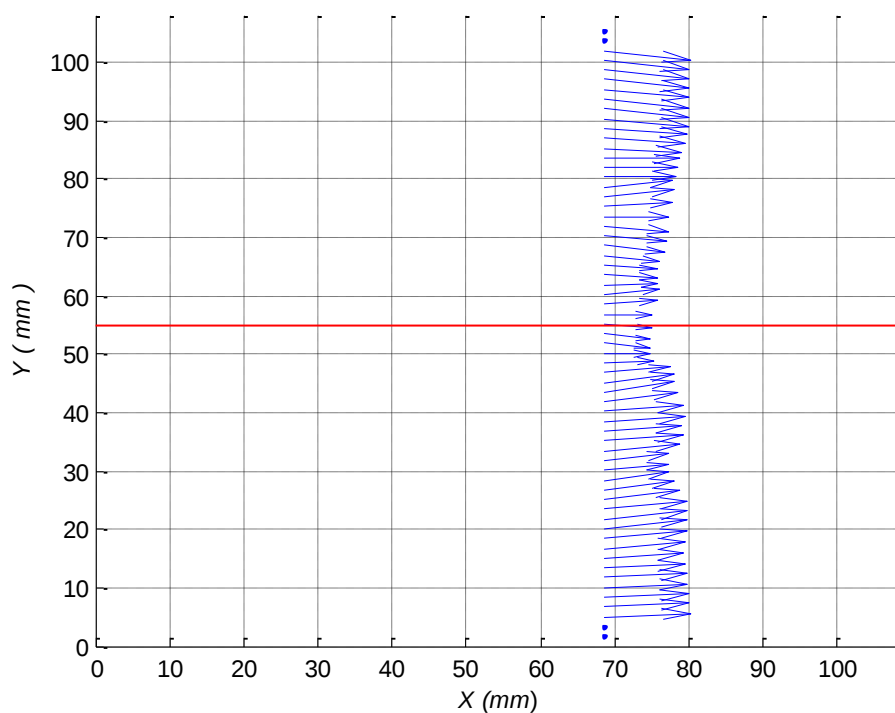


Figura 7.8: Estela a 1,1H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,5338$

- Posición B de la cámara.

Prueba 1

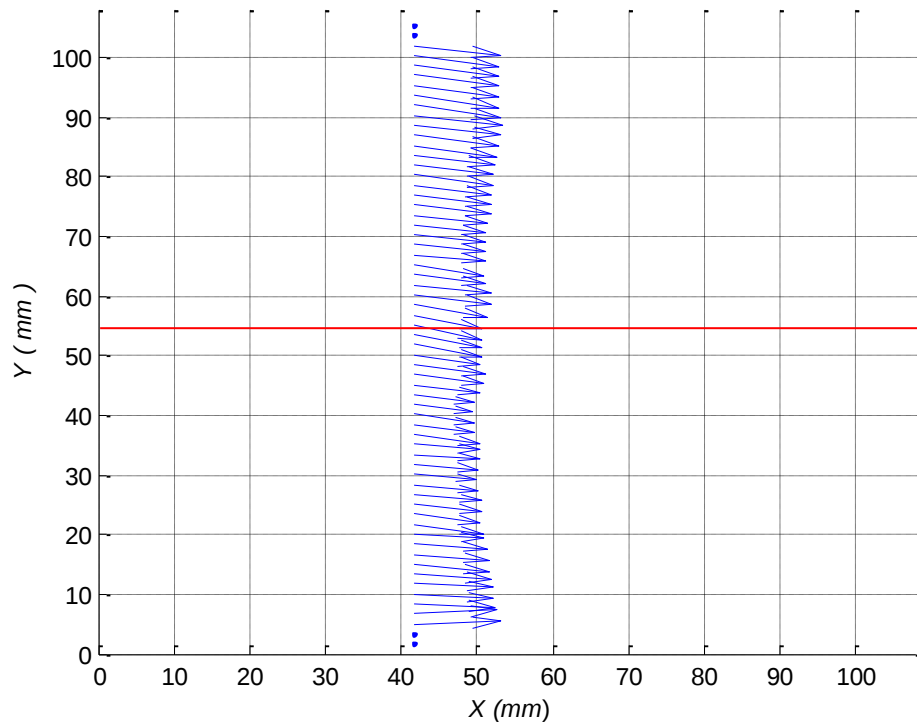


Figura 7.9: Estela a 1,8H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,3526$

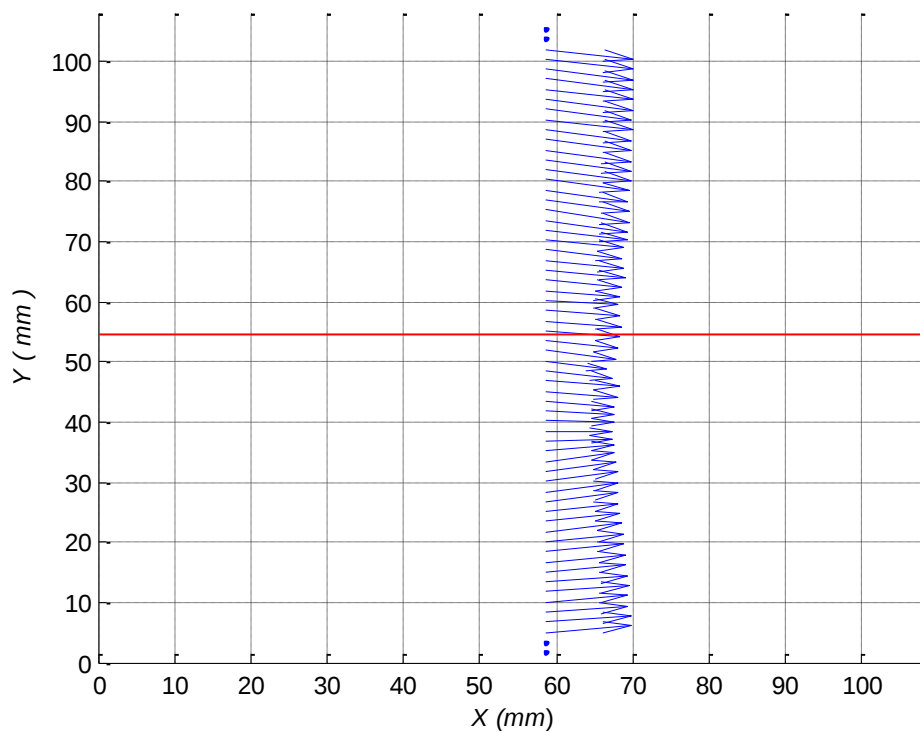


Figura 7.10: Estela a 2,1H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,2844$.

Prueba 2

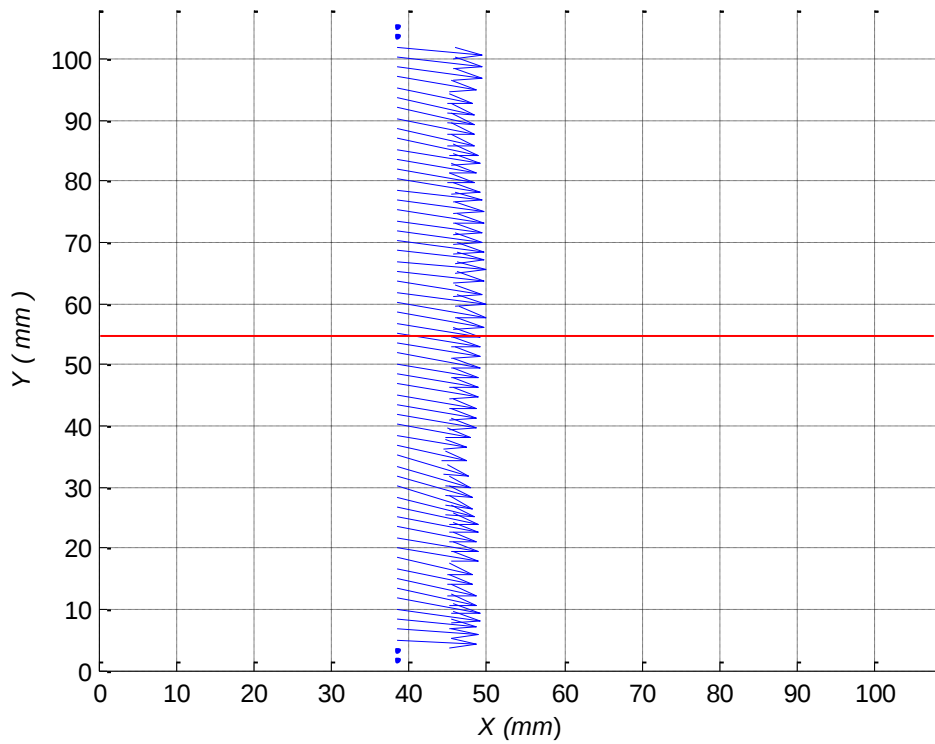


Figura 7.11: Estela a 1,9H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,2748$

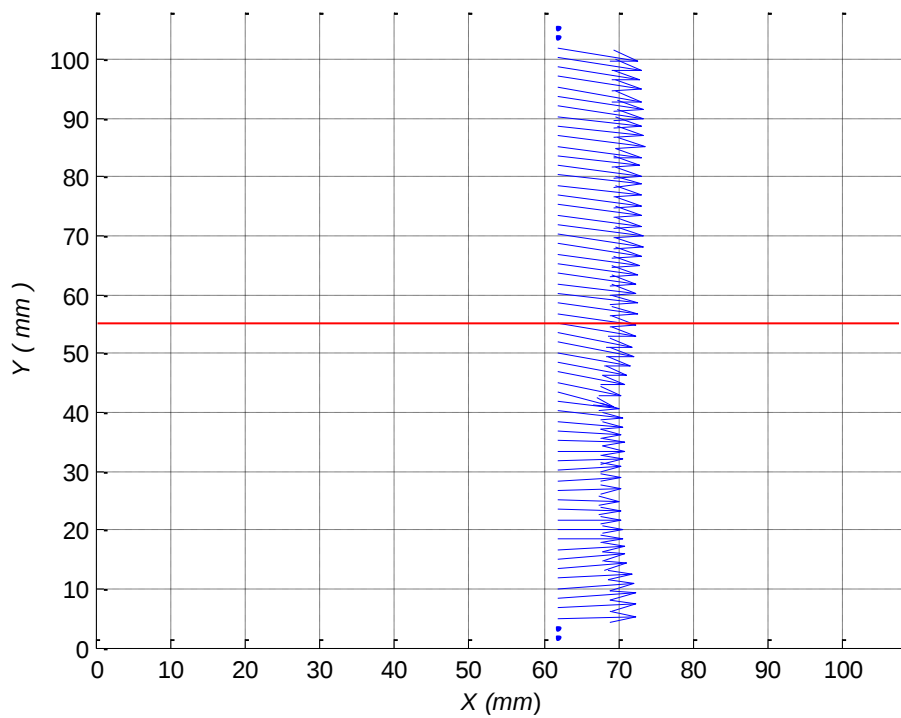


Figura 7.12: Estela a 2,2H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,2969$

- Posición C de la cámara.

Prueba 1

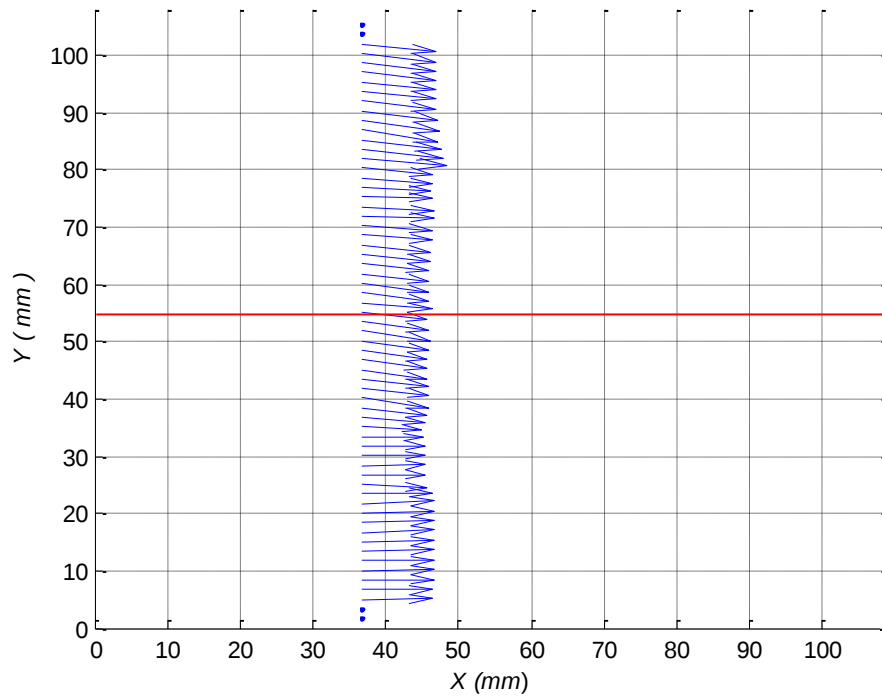


Figura 7.13: Estela a 4,7H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,2976$

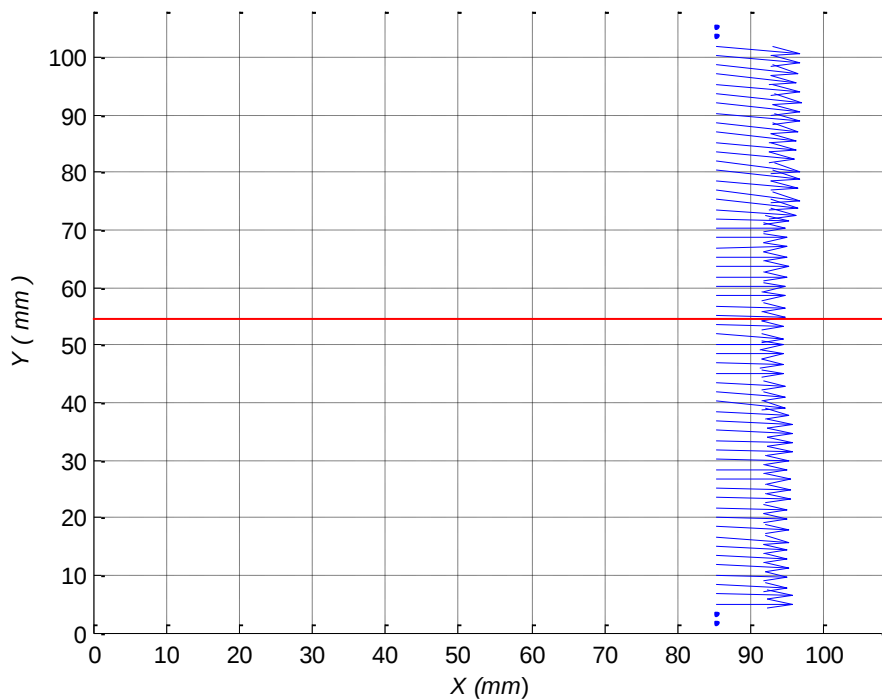


Figura 7.14: Estela 10 a 5,1 H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,3243$

Prueba 2

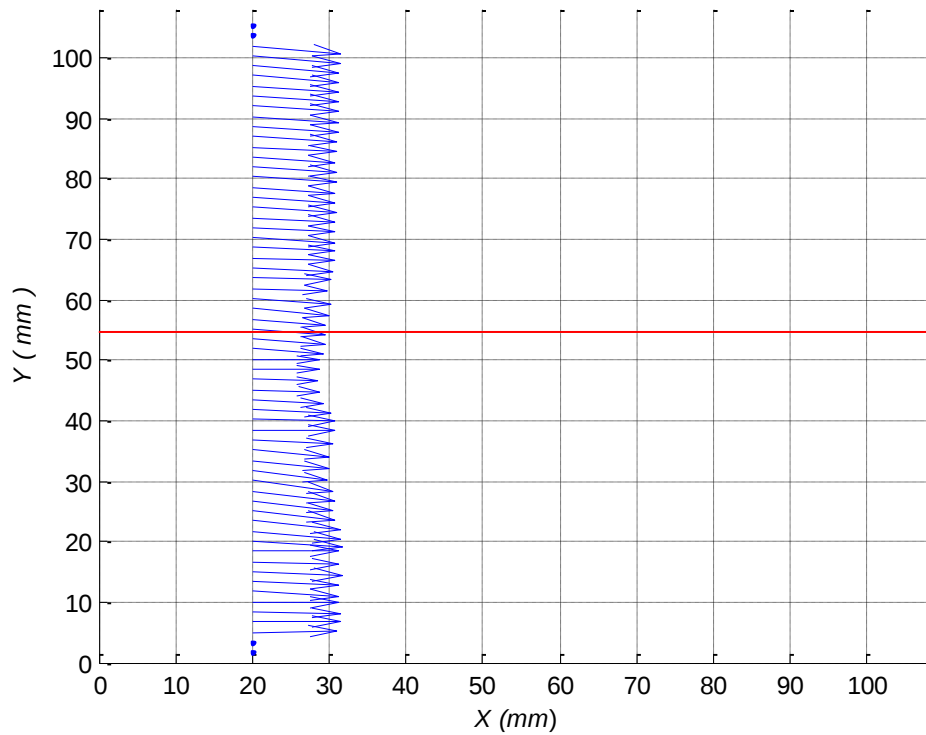


Figura 7.15: Estela a 4,7H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,2342$

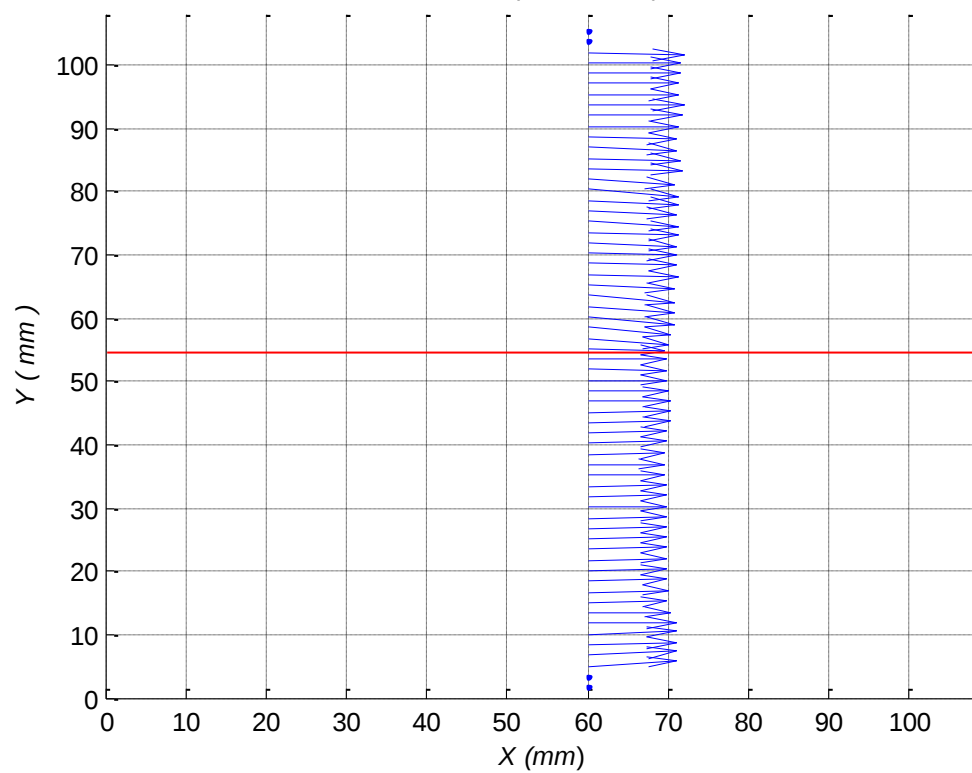


Figura 7.16: Estela a 5,1H para $Re=1,294 \times 10^5$. $C_D=0,2953$

En las figuras anteriores podemos percibir que las primeras estelas (posición A) no están dotadas de una simetría apreciable, mientras que, en las siguientes (posición B y C) sí que se puede advertir una simetría más acentuada. Todo ello está provocado a que la distancia de posicionamiento A de la cámara no se encuentra lo suficientemente distante del colín como para poder estudiar adecuadamente la estela debido a la presencia de perturbaciones demasiado grandes.

Un resumen de los valores de los coeficientes de resistencia medios para cada una de las mediciones es el siguiente:

	Media 1ª Prueba	Media 2ª Prueba	Media
Posición A	0,7066	0,5367	0,6217
Posición B	0,3275	0,3092	0,3184
Posición C	0,3703	0,298	0,3342
Media Total			0,3263

Tabla 7.1: Coeficientes de resistencia (C_D) de acuerdo a las estelas

Como se puede apreciar tanto en las figuras anteriores que muestran las estelas como en esta tabla los valores de los coeficientes de resistencia para el caso de las mediciones llevadas a cabo en la posición B y C de la cámara son relativamente homogéneas, mientras que, en la posición A existe una discrepancia relevante frente a las otras dos, resaltando pues, lo entredicho anteriormente de que la posición x dependerá de cada cuerpo, pero en todo caso, deberá elegirse de forma que se cumplan los requisitos indicados en la exposición llevada a cabo en el apartado 7.1; lo cual nos lleva la consideración de una estela lejana.

De modo que tiene más sentido calcular el coeficiente de resistencia de la moto mediante la media de las mediciones llevadas a cabo en la posición B y C, de esta forma, resulta pues, que $C_D=0.3263$.

7.1.7 Coeficiente de resistencia en OpenFOAM

Como ya hemos enunciado anteriormente la única condición que debe cumplirse para obtener un C_D que sea válido tanto par modelo como par prototipo es que el Re se mantenga. De modo que, si queremos evaluar cuál debería ser la velocidad necesaria a la que debería de circular la moto para que el Re tanto en modelo como en prototipo se mantenga constante bastaría con imponer la siguiente igualdad:

$$Re_m = Re_p \rightarrow \frac{v_{\infty m} L_m}{\nu_m} = \frac{v_{\infty p} L_p}{\nu_p} \quad [7.35]$$

donde los subíndices m y n hacen referencia al modelo y prototipo respectivamente.

Suponiendo que el aire se encuentra en las mismas condiciones y que las partículas de aceite empleadas en el PIV no afectan de manera relevante a las propiedades del fluido ($v_m = v_{\infty}$), además de que, la escala aplicada al modelo es 1:5,5 ($L_m = 5,5L_p$), se obtiene:

$$v_{\infty m} = \frac{v_{\infty p}}{5,5} = 4,41 \frac{m}{s} \quad [7.36]$$

Empleando dicha velocidad se ha llevado a cabo la simulación en OpenFOAM resultando un valor del coeficiente de resistencia igual a 0,3071, valor bastante próximo del obtenido en el caso del cálculo mediante la deficiencia de velocidad en las estelas.

De bibliografía se conocen los valores correspondientes al coeficiente de resistencia de algunas de las geometrías más elementales (figura 7.17) de las cuales podemos deducir a grandes rasgos que los valores obtenidos haciendo uso tanto de la estela como de la simulación numérica adquieren unos valores razonables, pues comparando nuestro carenado con una semiesfera el carenado es previsiblemente más óptimo aerodinámicamente hablando.

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

Figura 7.17: Coeficientes de resistencia

A continuación analizaremos como varía el coeficiente de resistencia para diferentes velocidades del flujo incidente, es decir, para diferentes valores del Re . Obteniendo de esta forma $C_D = \phi(Re)$. Para ello consideraremos varios Re y al cual le asignaremos su coeficiente de resistencia de acuerdo a los resultados obtenidos de OpenFOAM:

Re ($\times 10^5$)	C_D
0,274	0,4384
0,549	0,3567
0,783	0,3295
1,022	0,3161
1,294	0,3071
2,933	0,2912
5,867	0,2885
8,8	0,2884

Tabla 7.2. Valores del C_D de acuerdo a diferentes Re.

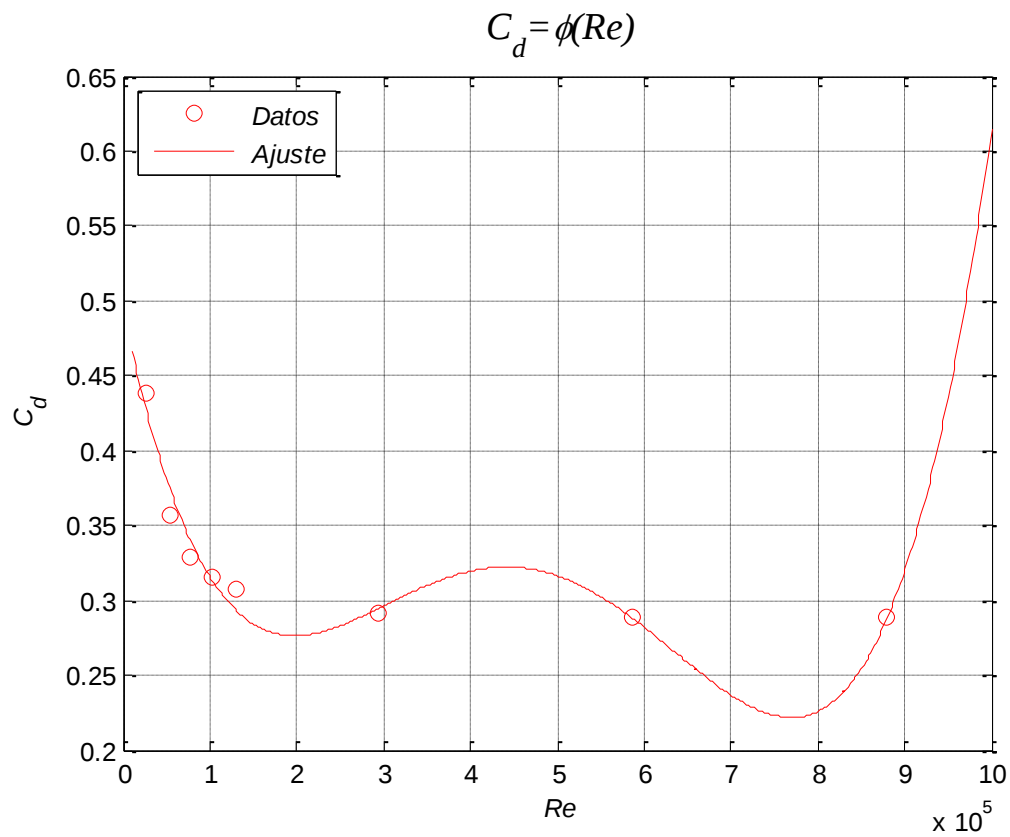


Figura 7.18: Ajuste teórico (OpenFOAM)

7.2. Descripción cualitativa

Para el análisis de resultados llevaremos a cabo una división de las zonas circundantes a la moto, pues así lo ha requerido la instalación, al no ser posible el posicionamiento (tanto del láser como de la cámara) lo suficientemente retirado del túnel como para hacer posible una captación lo suficientemente amplia del flujo de partículas alrededor de la moto en el plano láser a lo largo de toda la longitud de la moto (tampoco se disponía de lentes de la cámara que lo permitiese).

En esta sección mostraremos las isosuperficies que son excelentes traductores de las zonas donde tienen lugar los fenómenos turbulentos más interesantes, las recirculaciones, desprendimiento de la capa límite...

7.2.1. Zona frontal

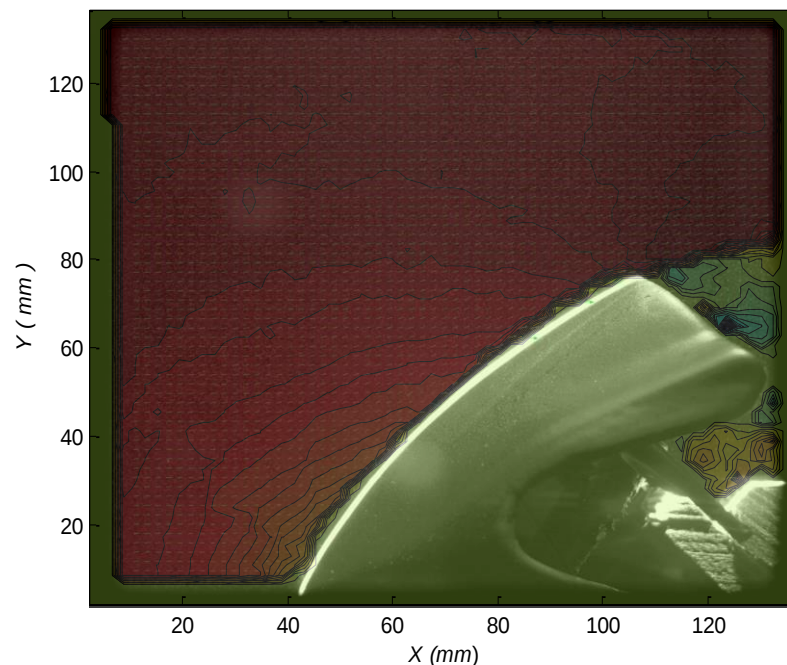


Figura 7.19: Situación de la zona

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

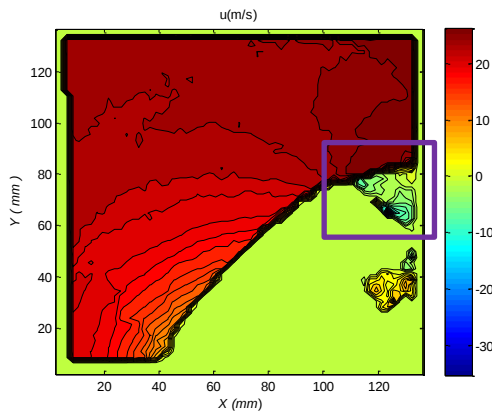


Figura 7.20

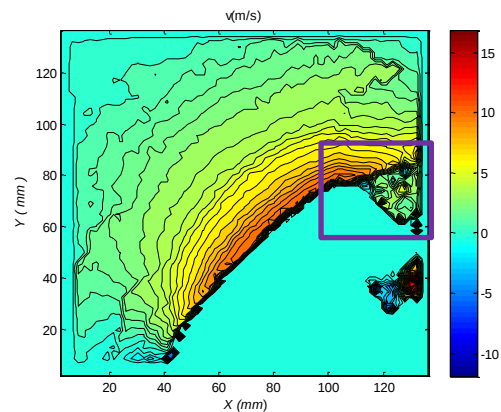


Figura 7.21

En las figuras 7.20 y 7.21 se denotan una clara recirculación del flujo en la parte superior derecha de la cúpula (zona recuadrada) dado que tanto la componente horizontal (u , velocidad axial) de la velocidad como la componente vertical (v , velocidad transversal) toman valores negativos, indicando pues, que dichas partículas se mueven en dirección contraria a la del flujo incidente. Esta zona se encontrará a una baja presión, dado que la recirculación está asociada a una presión baja.

En la zona inferior izquierda la cúpula redirecciona el flujo, provocando una disminución de la componente x de la velocidad y un aumento de la componente y .

- Para $Re=9,1968 \times 10^4$

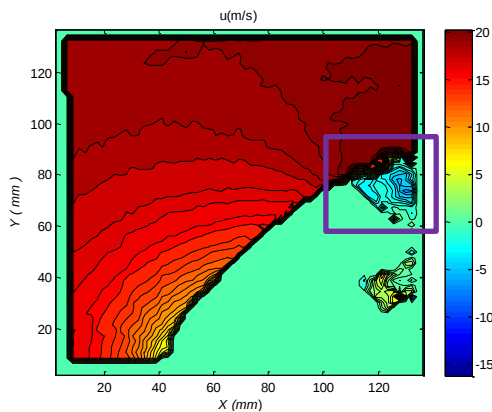


Figura 7.22

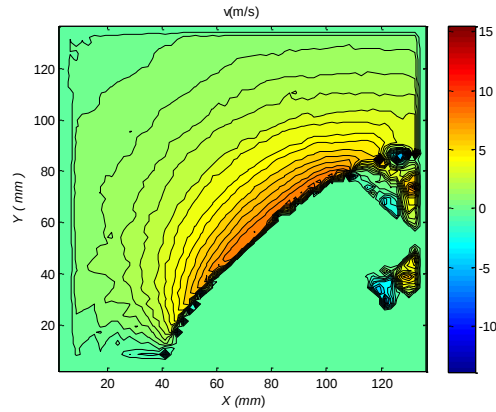


Figura 7.23

De nuevo nos percatamos como para este Reynolds se sigue manteniendo la recirculación dado que la componente x sigue teniendo un valor negativo en la zona remarcada.

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

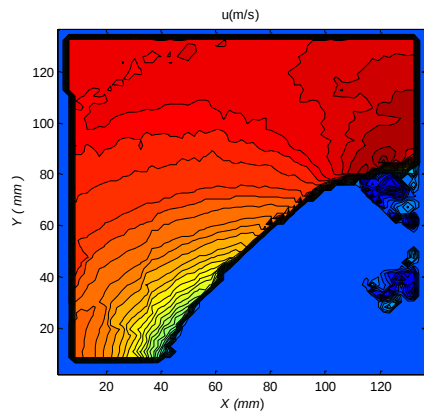


Figura 7.24

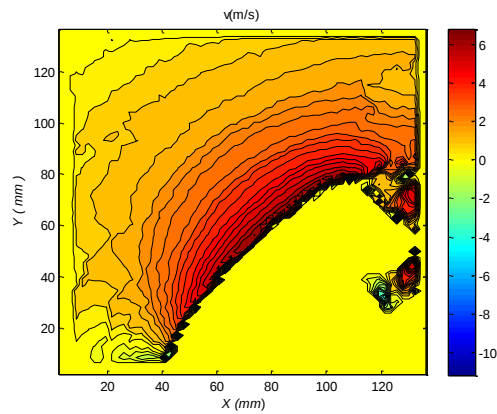


Figura 7.25

- Para $Re=4,944 \times 10^4$

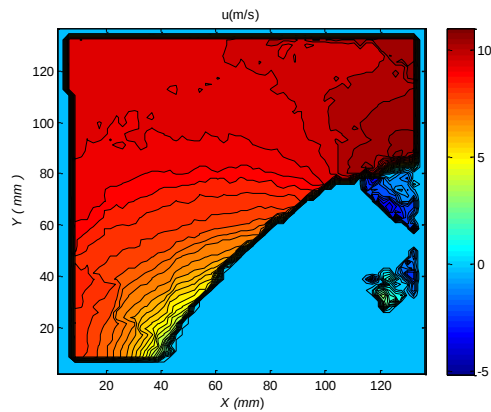


Figura 7.26

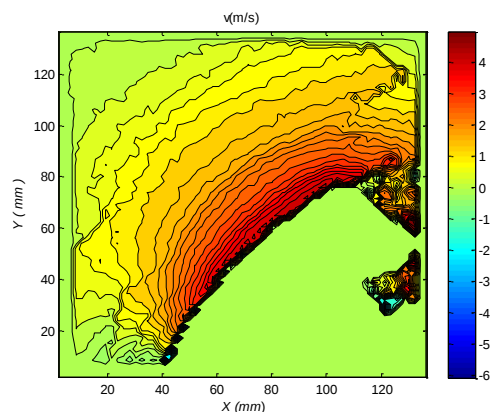


Figura 7.27

- Para $Re=2,4643 \times 10^4$

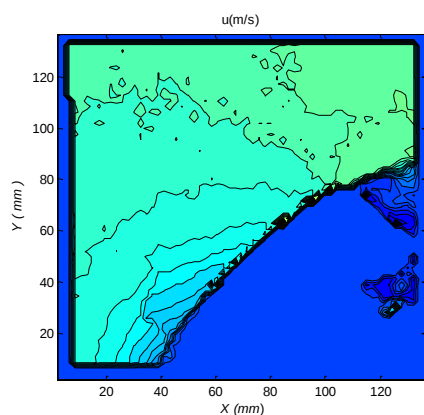


Figura 7.28

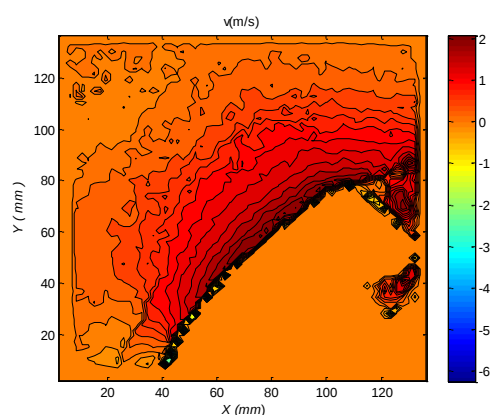


Figura 7.29

De la figura 7.19, 7.21, 7.23, 7.25 y 7.27 se puede apreciar como la componente axial de la velocidad de la zona de interés toma un valor

prácticamente nulo (tanto la componente x como la y), lo que quiere decir, que deja en estos casos producirse recirculación alguna.

Esto tiene lugar como consecuencia de que aunque en todos los casos mostrados en las figuras anteriores nos encontramos en la transición entre flujo turbulento y laminar, en las figuras superiores (mayor Re) nos encontramos más cerca de un flujo turbulento mientras que las figuras inferiores tienden hacia un flujo laminar.

7.2.2 Zona Depósito

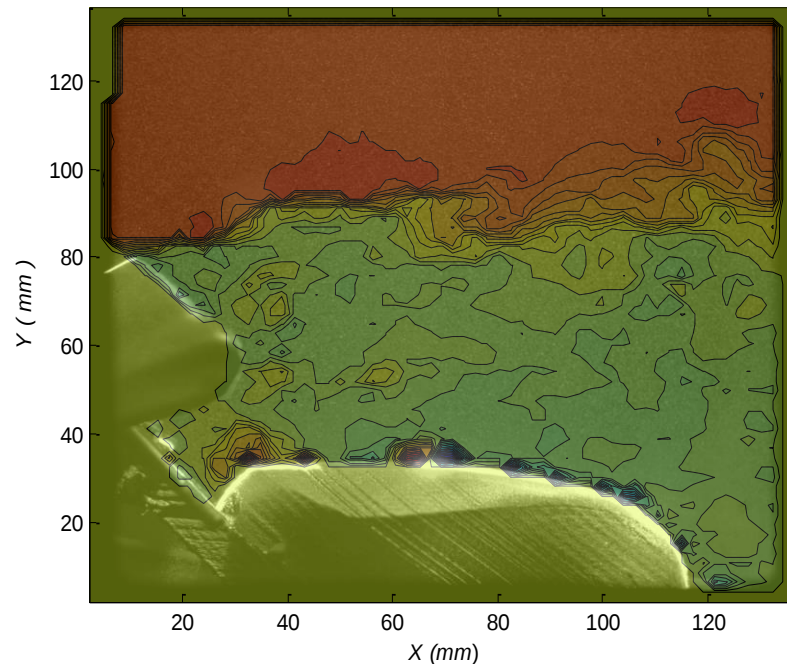


Figura 7.30: Situación de la zona

Como se puede advertir existen unas perturbaciones en la zona superior de la superficie del depósito causadas por el reflejo del plano láser al incidir sobre la misma. Esta reflexión era causada debido a que el PLA, material empleado para la fabricación del depósito, tiene una alta reflectancia.

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

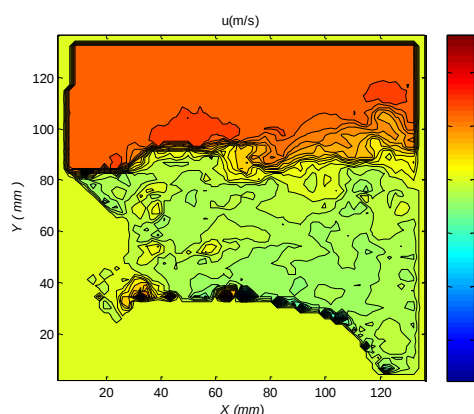


Figura 7.31

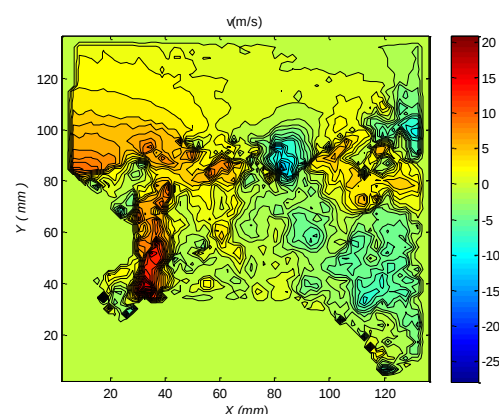


Figura 7.32

Se aprecia de nuevo y ahora de una forma bastante más relevante una recirculación en la zona que queda detrás de la cúpula (zona donde se encontraría el piloto) y un desprendimiento brusco de la estela en la parte superior de la separatrix.

También podemos apreciar que la componente negativa de la velocidad es bastante mayor en la dirección x que en la y, y ello es debido a que el flujo uniforme que circula por encima de la separatrix antes nombrada bloquea el desplazamiento vertical del flujo.

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

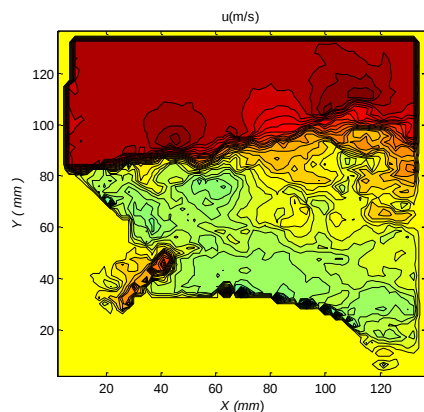


Figura 7.33

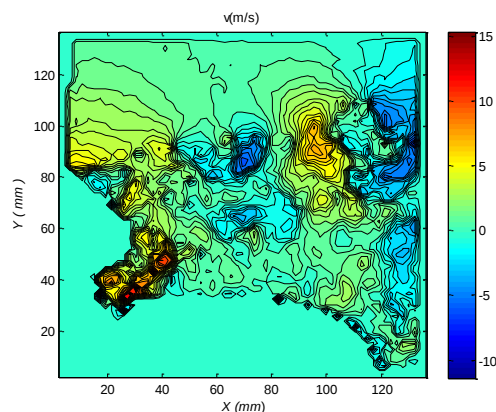


Figura 7.34

- Para $Re=2,4643 \times 10^4$

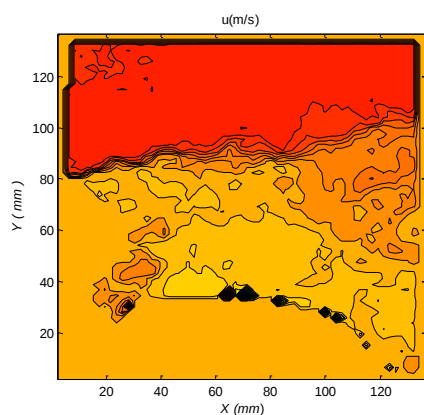


Figura 7.35

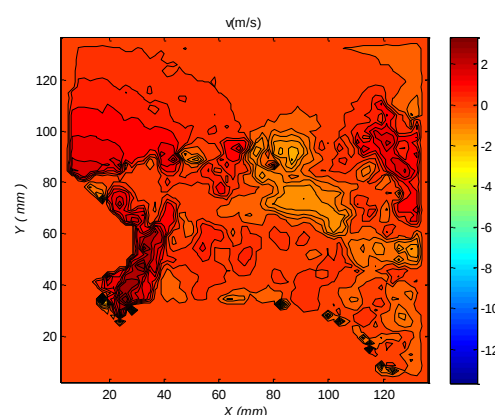


Figura 7.36

De nuevo a medida que disminuye el Re se observa que en la recirculación la componente x de la velocidad disminuye llegando a ser prácticamente nula, como es lógico, a bajos Re .

7.2.3. Zona Asiento-Colín

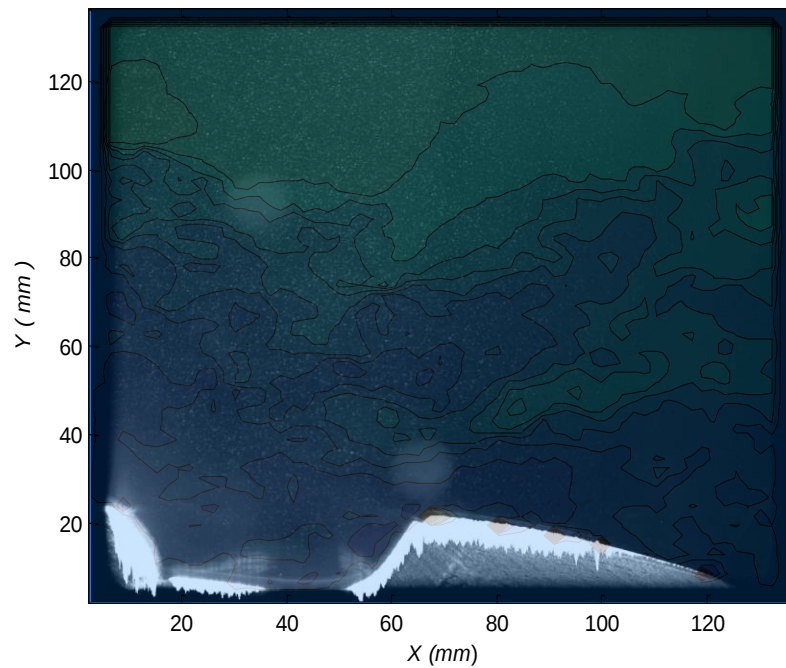


Figura 7.37: Situación de la zona

Nótese la existencia de esas pequeñas perturbaciones localizadas en la superficie superior del colín.

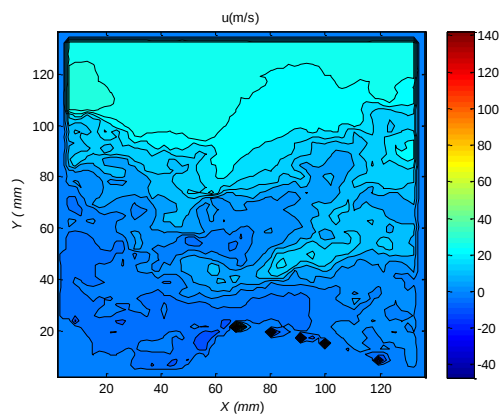


Figura 7.38: $Re=1.1645 \times 10^5$

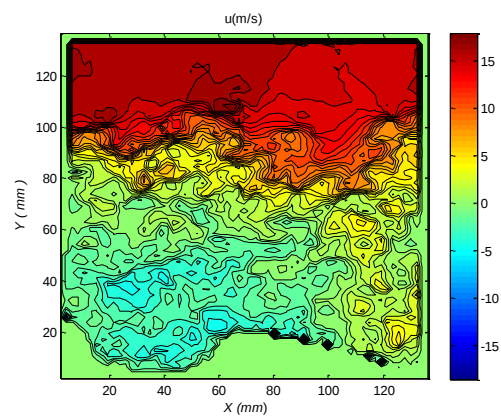


Figura 7.39: $Re=7,0464 \times 10^4$

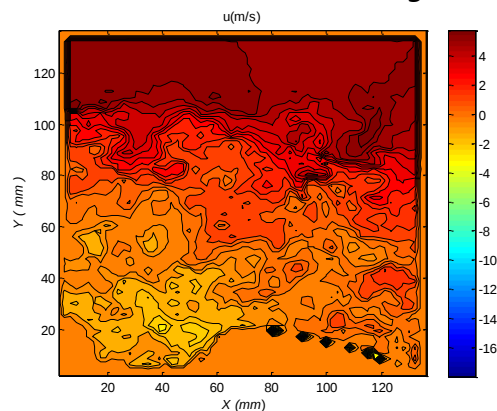


Figura 7.40: $Re=2,4643 \times 10^4$

Como se puede notar en la figura 7.38 la recirculación a Re elevados es de gran intensidad y longitud llegando incluso a valores de velocidad negativos de -40 m/s. En la figura 7.39, con Re más bajo, se observa como la recirculación es bastante menor, con valores de velocidad negativos cercanos a cero. Finalmente en el caso de la figura 7.40 la recirculación es de muy pequeña magnitud siendo solo relativamente considerable al final del asiento y comienzo del colín, región donde se produce una pérdida de presión dinámica considerable.

7.2.4. Zona final del Colín

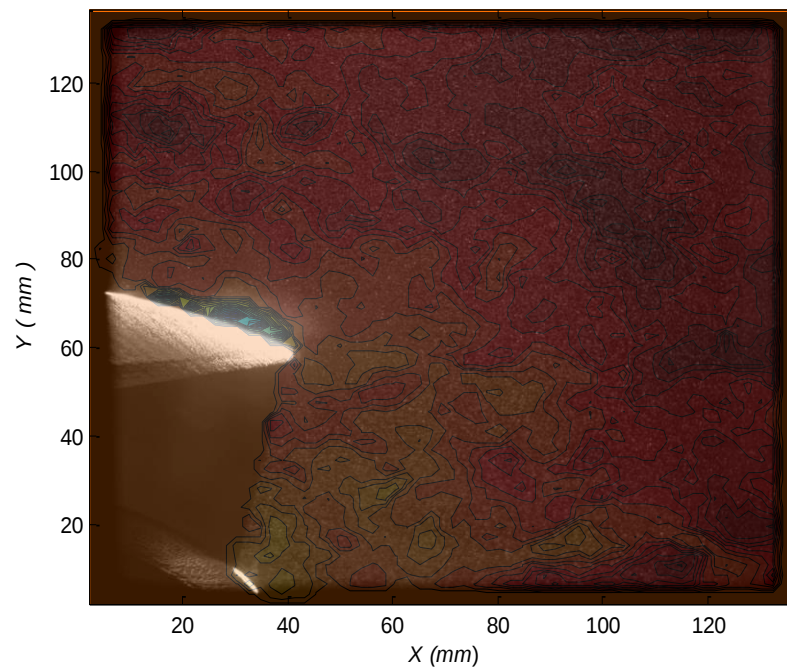


Figura 7.41: Situación de la zona

En este caso se tiene una perturbación debido al reflejo algo más grande, pero tampoco implica problema alguno, dado que, solo afecta a la zona donde está situada (región oscura) sin incidir en la zona y flujo circundante.

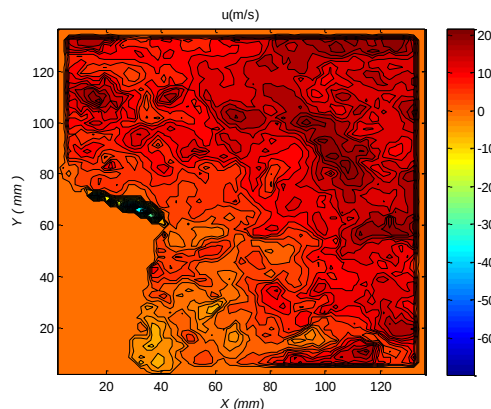


Figura 7.42: $Re=1.1645 \times 10^5$

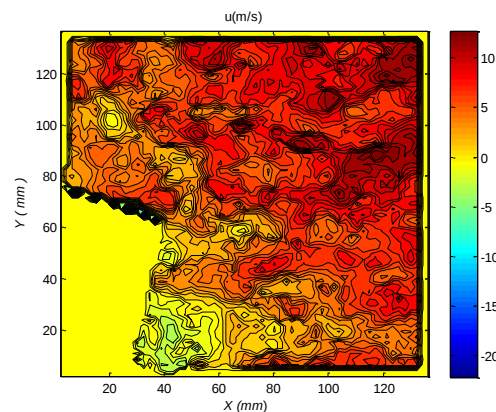


Figura 7.43: $Re=7.0464 \times 10^4$

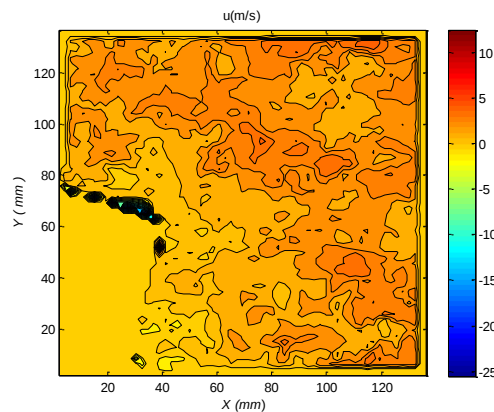


Figura 7.44: $Re=2,4643 \times 10^4$

Analizando las figuras 7,42, 7,43 y 7,44 se percibe que la recirculación producida es de baja intensidad, incluso para Re altos.

En esta zona tiene lugar una pérdida de presión aguas abajo, produciendo una estela con una presión inferior. Esta perturbación es la aprovechada en competición por las motos que circulan detrás de la moto en cuestión, aprovechando esta depresión (rebufo) para disminuir su coeficiente de arrastre.

7.2.5. Zona lateral simétrica 1 (Plano laser a $Z=162$ mm)

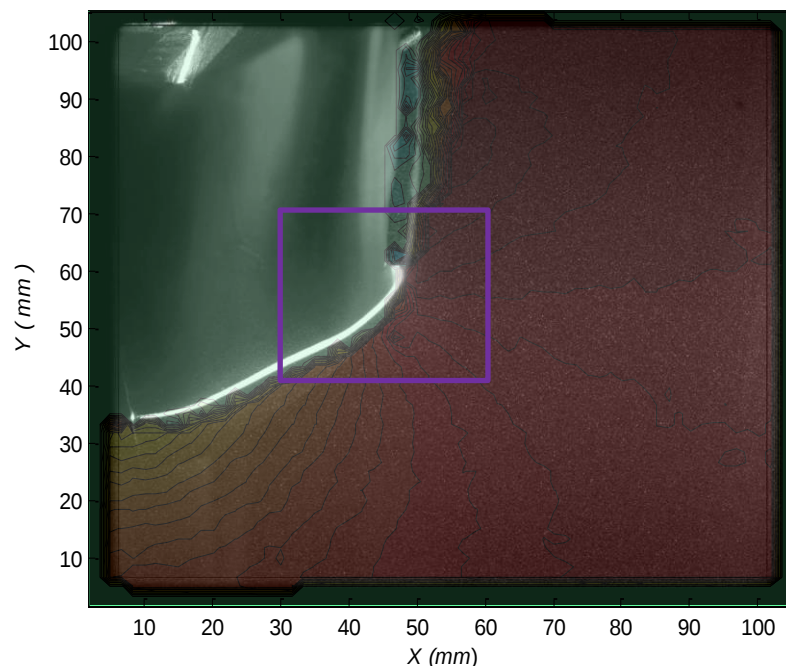


Figura 7.45: Situación de la zona

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

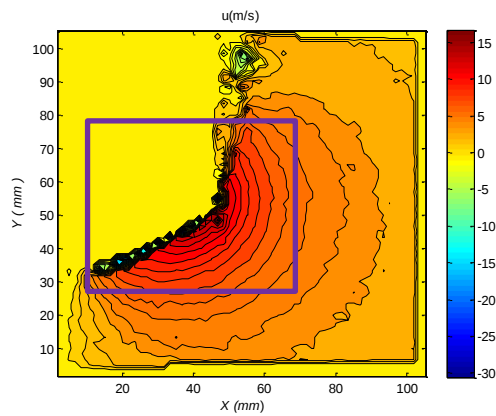


Figura 7.46

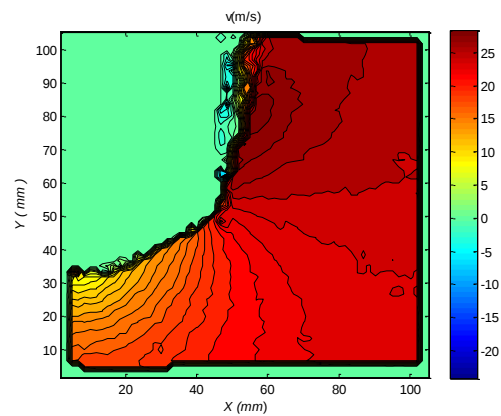


Figura 7.47

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

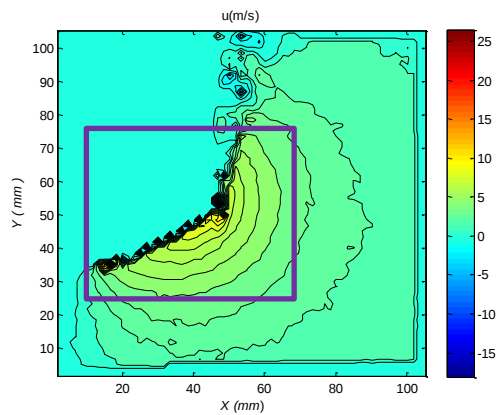


Figura 7.48

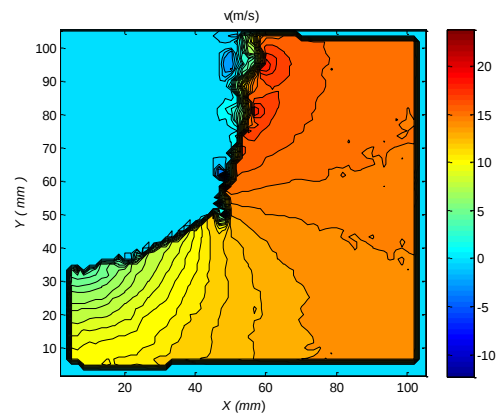


Figura 7.49

En este caso el flujo axial (v) experimenta una disminución en su magnitud para valores de x cercanos a cero (plano de simetría). El flujo transversal (u) se ve incrementado en el lateral de la cúpula (región recuadrada).

7.2.6. Zona lateral simétrica 2 (Z=162 mm)

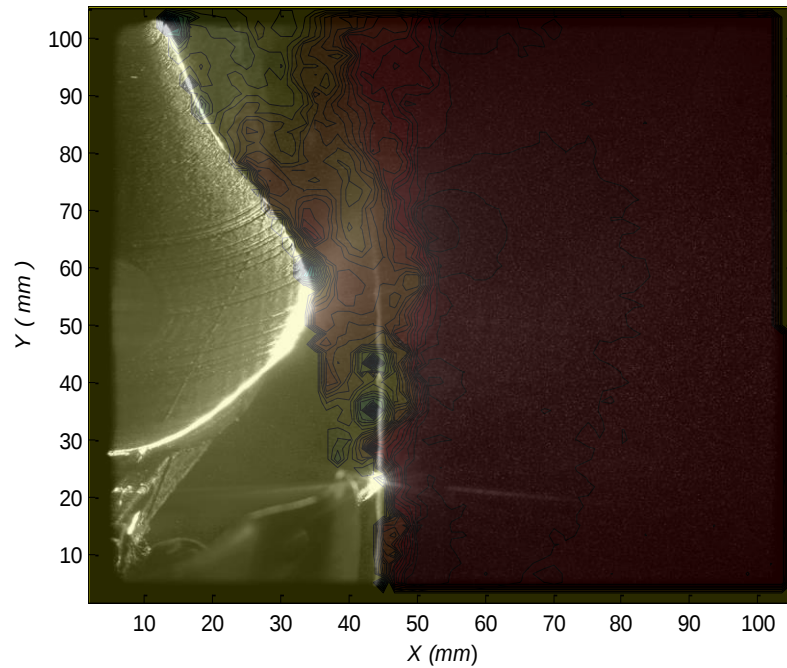


Figura 7.50: Situación de la zona

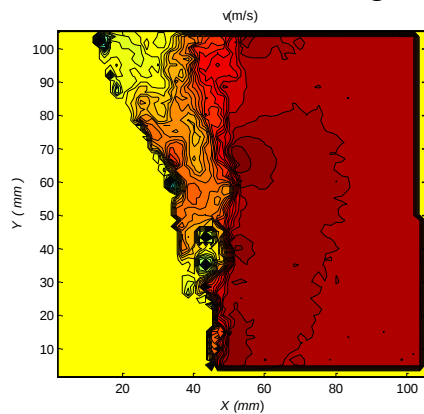


Figura 7.51: $Re=1.1645 \times 10^5$

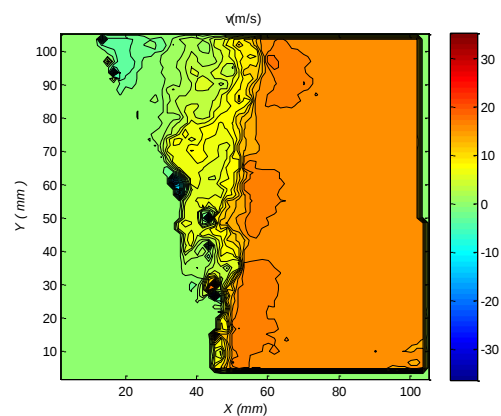


Figura 7.52: $Re=7,0464 \times 10^4$

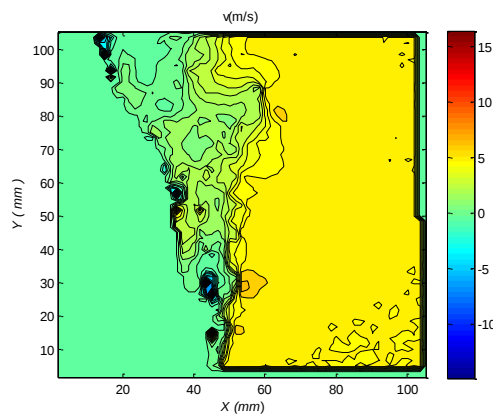


Figura 7.53: $Re=2,4643 \times 10^4$

En las figuras 7.51, 7.52 y 7.53 la magnitud de la recirculación es poco relevante y se observa el comienzo del desprendimiento en la zona de lateral de la cúpula.

7.2.7. Zona lateral simétrica 3 ($Z=162\text{ mm}$)

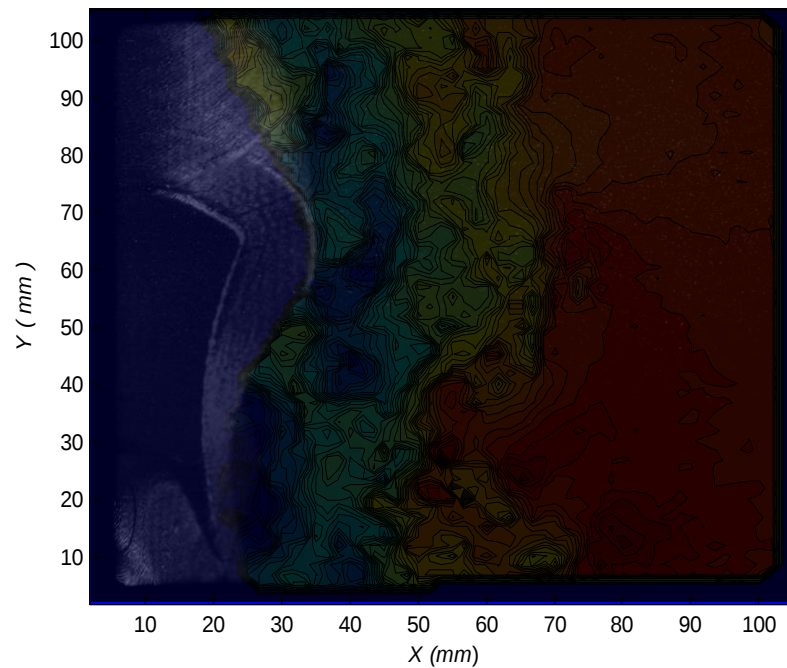


Figura 7.54: Situación de la zona

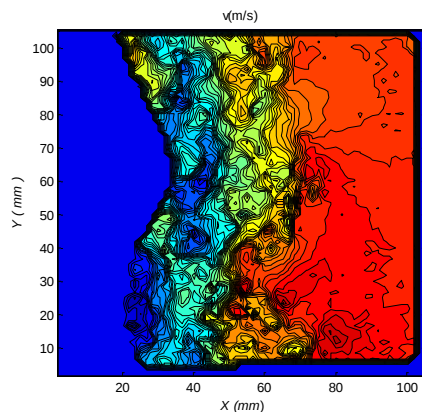


Figura 7.55: $Re=1.1645 \times 10^5$

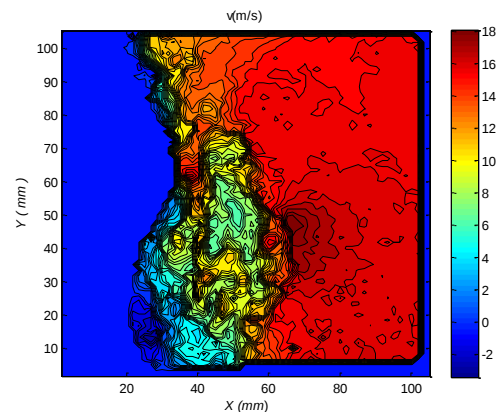


Figura 7.56: $Re=7.0464 \times 10^4$

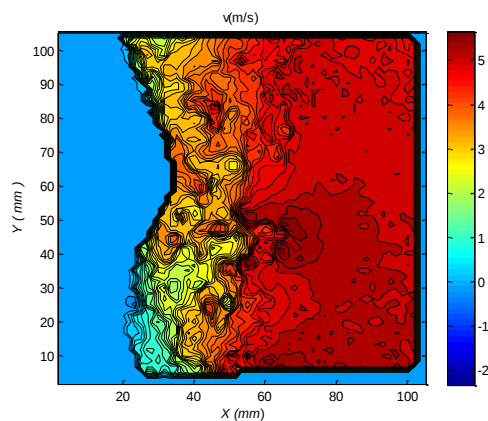


Figura 7.57: $Re=2,4643 \times 10^4$

7.2.8. Zona lateral simétrica 4 ($Z=162$ mm)

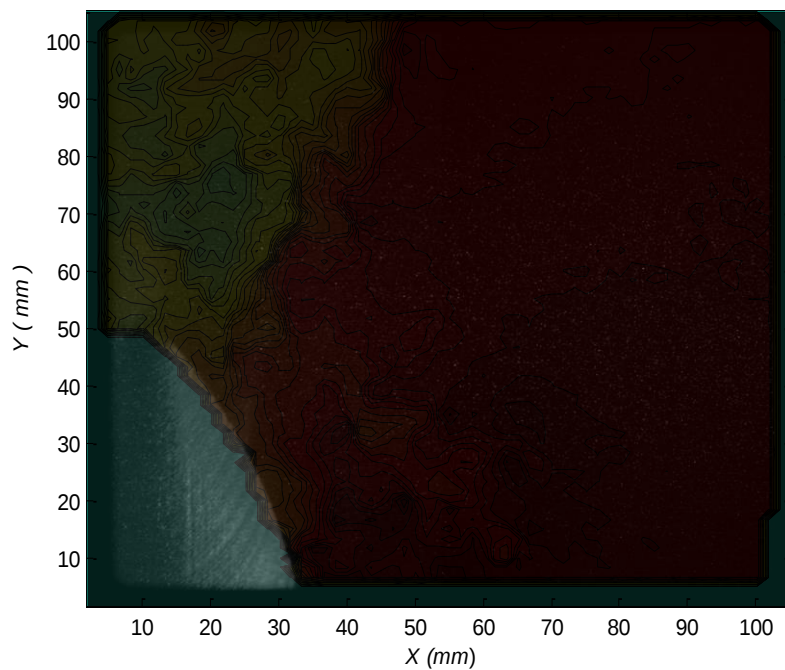


Figura 7.58: Situación de la zona

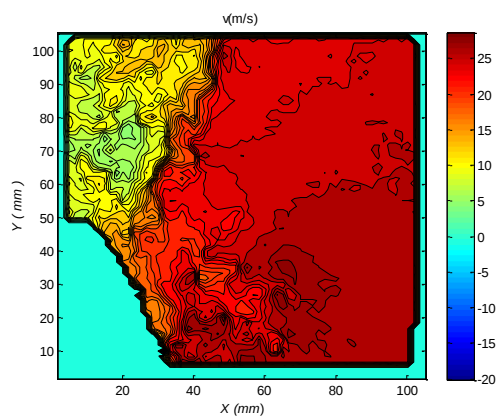


Figura 7.59: $Re=1.1645 \times 10^5$

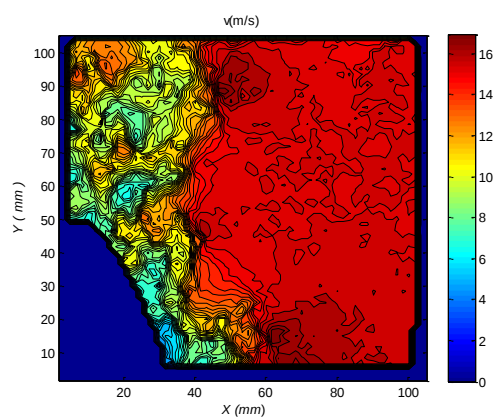


Figura 7.60: $Re=7,0464 \times 10^4$

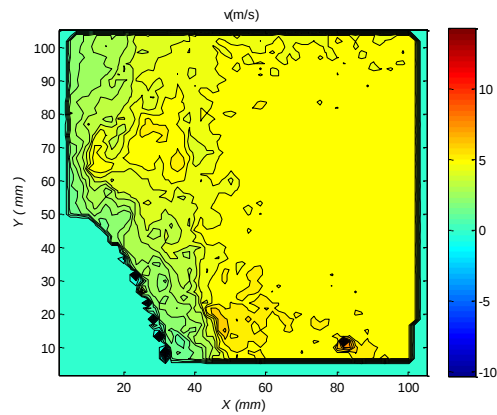


Figura 7.61: $Re=2,4643 \times 10^4$

En estas figuras no se aprecia recirculación aunque si se observa una disminución en la velocidad de la componente axial del flujo aguas abajo del colín, especialmente en el plano de simetría del colín (situado en $X=0$).

7.3 Resultados OpenFOAM

7.3.1. Contornos de velocidad

En las soluciones obtenidas de la simulación aunque no se puede percibir adecuadamente las recirculaciones locales, dado que, el refinamiento de malla conseguido no es lo suficientemente preciso (debido a la limitación computacional), sí que se puede apreciar de acuerdo a los resultados obtenidos para los contornos de la velocidad axial que la región de circulación ha sido bien caracterizada.



Figura 7.62

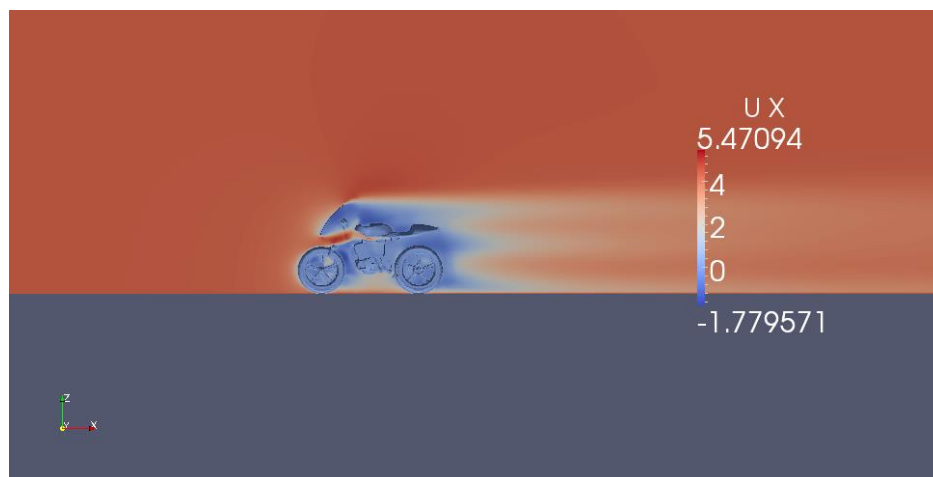


Figura 7.63

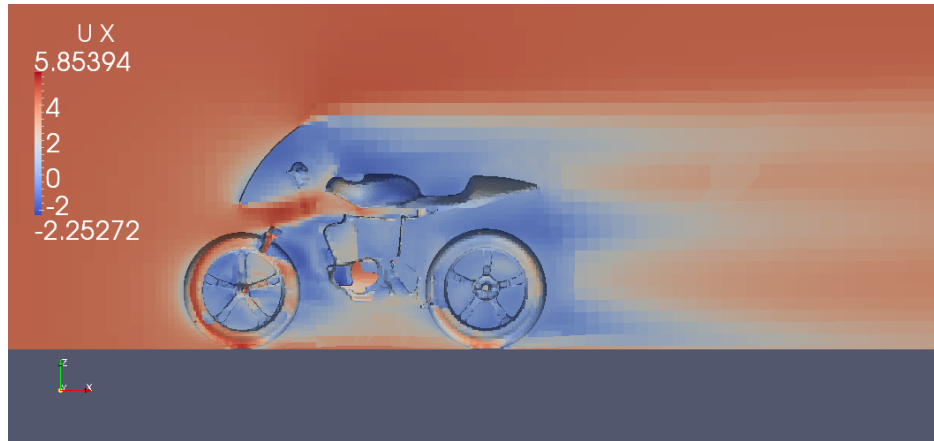


Figura 7.64

7.3.2. Ram-Air

El Ram-Air, es un sistema de admisión que se vale de la presión dinámica del aire creada por el movimiento de la moto para conseguir un incremento de la presión estática en el interior del motor. Este aumento de la presión estática provoca que el flujo de masa que entra en el motor sea mayor, consiguiendo de esta manera incrementar la potencia del motor. Este resultado se podría equiparar al obtenido en otros automóviles con el uso del turbo.

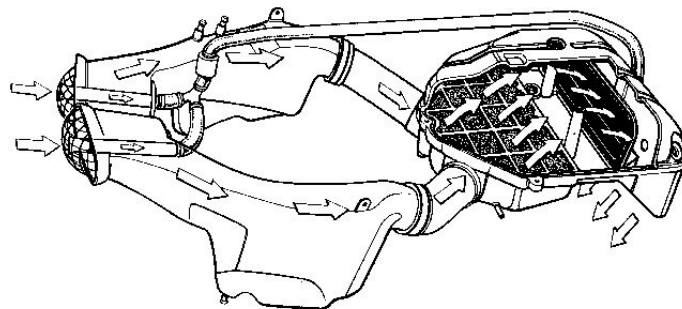


Figura 7.65: Esquema de funcionamiento de un Ram-Air

Con el Ram-Air se consigue reducir la velocidad del fluido mediante un incremento de la sección transversal de los conductos de admisión, con esta disminución de la velocidad se consigue que la presión dinámica también lo haga, y por el contrario aumente la presión estática. El aumento de la presión estática en el Air-Box, tiene un efecto muy positivo en la potencia del motor, ya que junto con el incremento de la presión estática se produce un aumento de la densidad del aire.

El Ram-Air está formado por:

- Toma de aire en el carenado. Su principal función es la de captar el aire desde el punto más favorable del carenado.

- Conductos de admisión. Son los encargados de hacer que el flujo de aire captado por la entrada del sistema de admisión en el carenado llegue al Air-Box, habiendo sufrido la mínima pérdida de carga posible.
- Air-Box (apartado 3.3). Se trata de la parte más importante del sistema dinámico de admisión. Es la caja de la cual el motor adquiere el aire para su mezcla con el combustible y su posterior introducción en los cilindros.

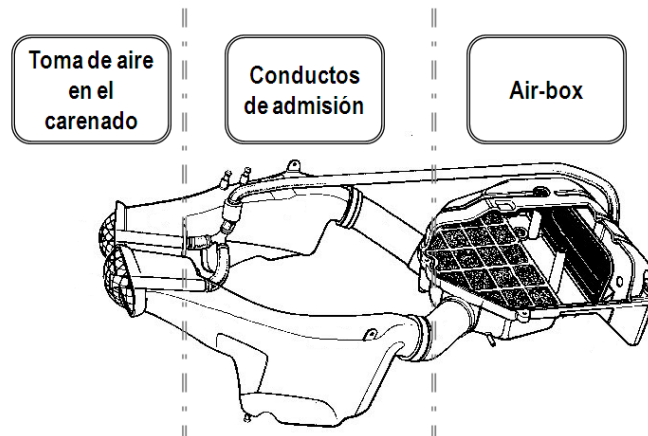


Figura 7.65: Esquema de partes del Ram-air

Después de que el aire sea captado por la toma situada en el carenado, y conducido a través de los conductos de admisión hasta el Air-Box, este cumple su función principal, que no es otra que intentar conseguir que la presión estática del interior del Air-Box aumente, mejorando así las condiciones del flujo másico que será absorbido por los cilindros.

De acuerdo a los resultados obtenidos para el caso de las presiones se puede justificar el posicionamiento de la toma de aire en el punto central más bajo de la cúpula (punto P), ya que tal y como se observa en las siguientes figuras (donde se puede apreciar la distribución de presiones en la superficie de la moto) es donde se encuentra el punto de remanso.

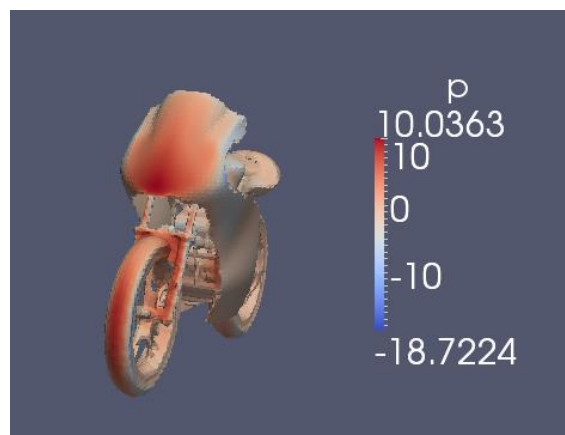


Figura 7.41

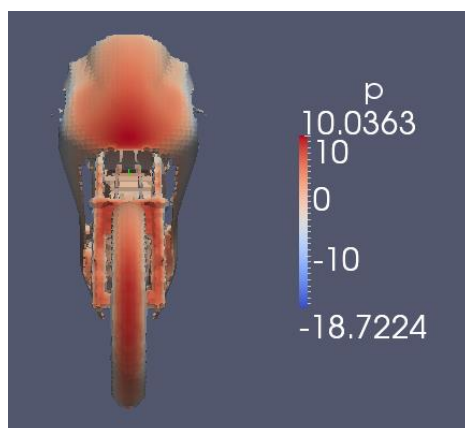


Figura 7.42

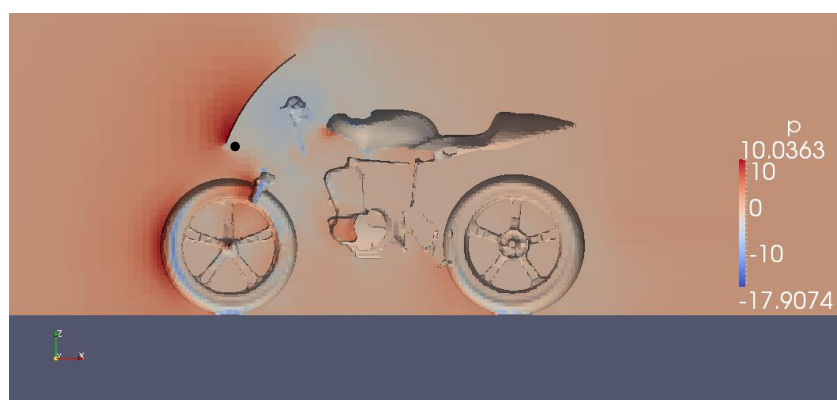


Figura 7.43

A esta misma conclusión podemos llegar si observamos los contornos de velocidades en la zona inferior frontal:

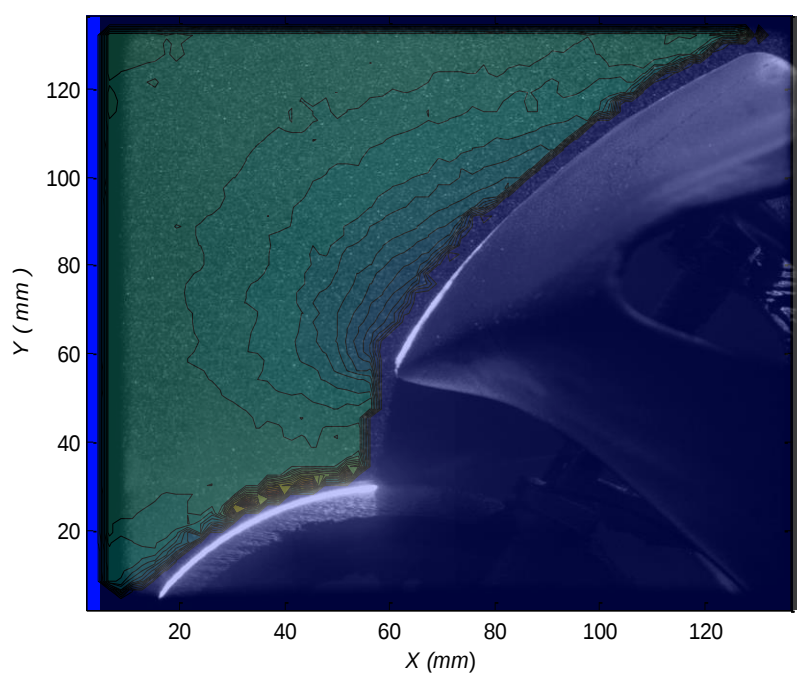


Figura 7.44

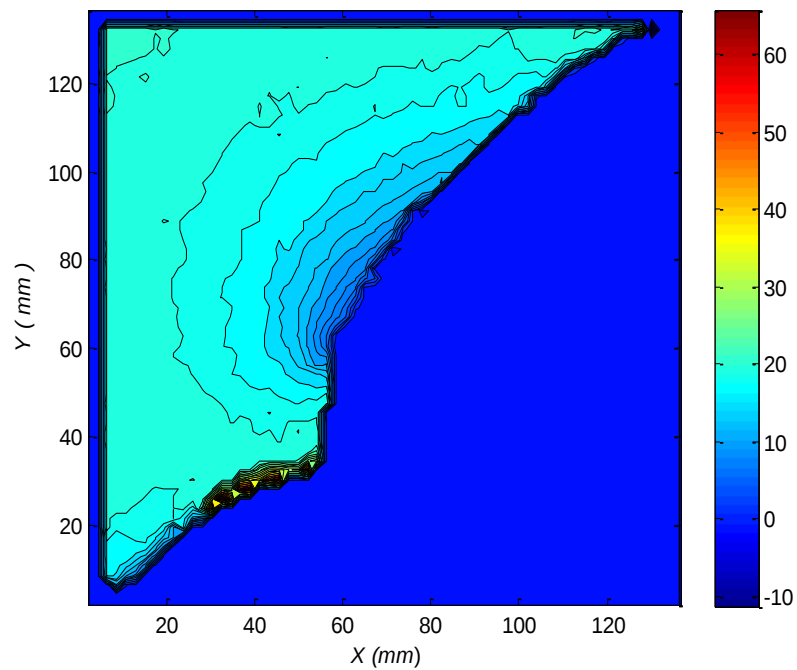


Figura 7.45

Se observa que la velocidad en el punto P es muy pequeña, con lo cual, la presión estática es grande, lo cual nos interesa como entrada de la toma del aire del Ram-Air.

7.4. Líneas de corriente

Estas son aquellas líneas tangentes en cada uno de sus puntos al vector velocidad local, en un instante dado, es decir, no hay flujo a través de una línea de corriente, sino a lo largo de ella e indica la dirección que lleva el fluido en movimiento en cada punto.

Como comentamos en el apartado 2.3, la ecuación de Bernoulli es aplicable a las líneas de corriente:

$$p + \frac{1}{2} * \rho * v^2 + \rho * g * z = Cte$$

7.4.1. Zona frontal

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

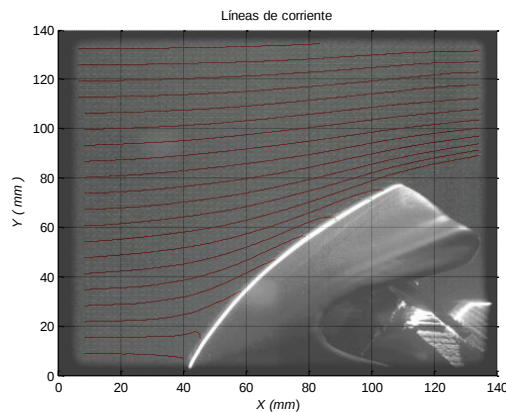


Figura 7.46

De acuerdo a la expresión de Bernoulli (considerando despreciable el término de diferencia de alturas) un aumento en la velocidad del fluido va acompañado de una disminución de la presión y viceversa.

Las zonas donde las líneas de corriente se encuentran más próximas entre sí, nos indica una mayor velocidad en módulo y una menor presión estática, y al contrario, las regiones donde las líneas de corriente se encuentran más distantes nos indican una menor velocidad y mayor presión estática.

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

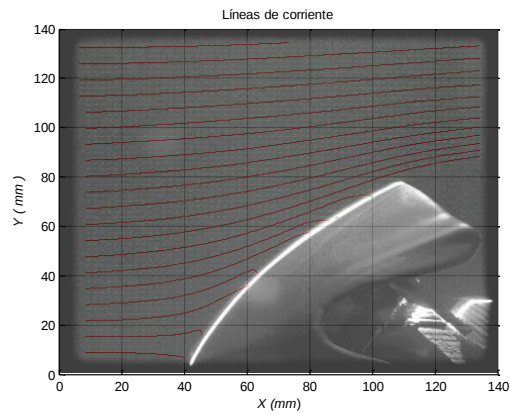


Figura 7.47

- Para $Re=2,4643 \times 10^4$

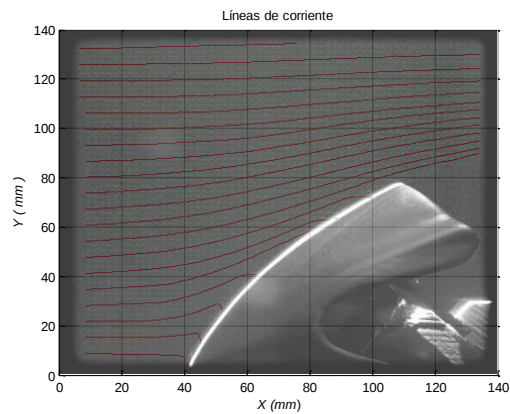


Figura 7.48

Como vemos las discrepancias en el comportamiento de las líneas de corriente para diferente Re no son muy relevantes.

7.4.2 Zona Depósito

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

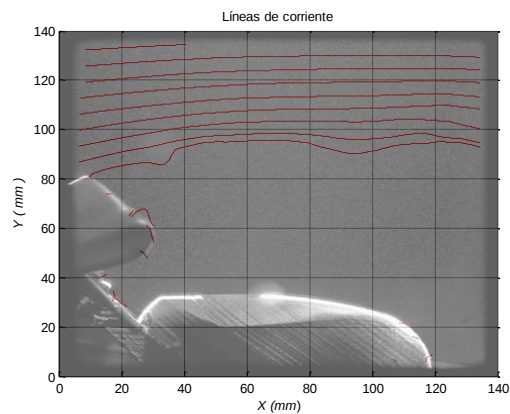


Figura 7.49

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

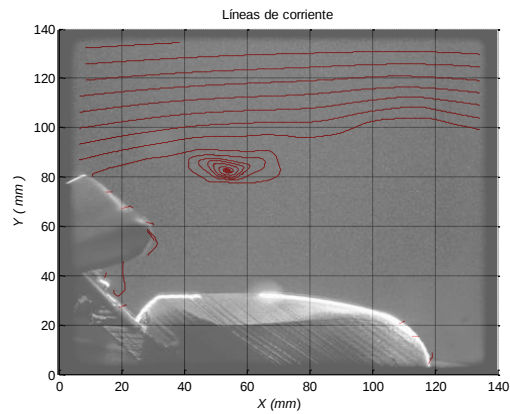


Figura 7.50

- Para $Re=2,4643 \times 10^4$

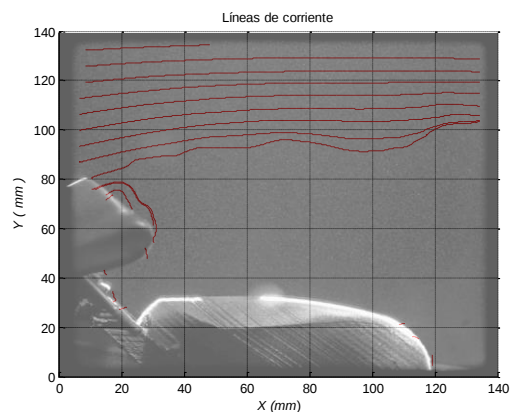


Figura 7.51

Si representamos algunas de las líneas de corriente del flujo de aire que se encuentra en la zona levemente superior al depósito (donde la velocidad del aire es baja) se obtiene:

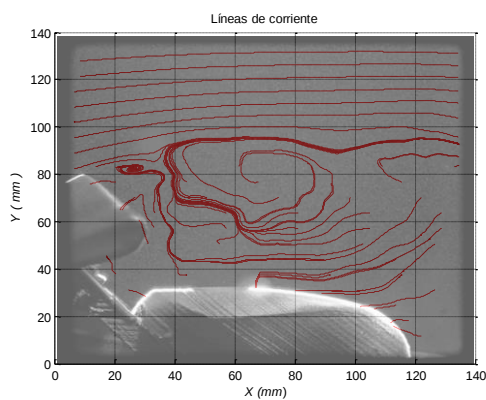


Figura 7.52: 1.1645×10^5

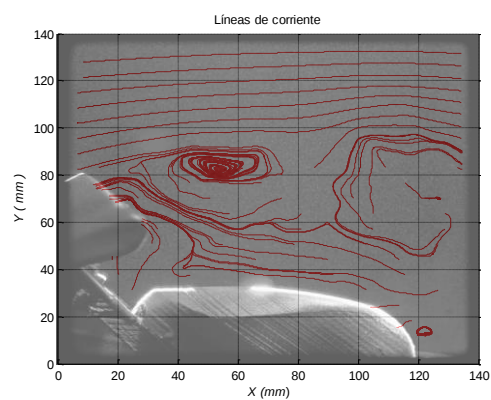


Figura 7.53: $7,0464 \times 10^4$

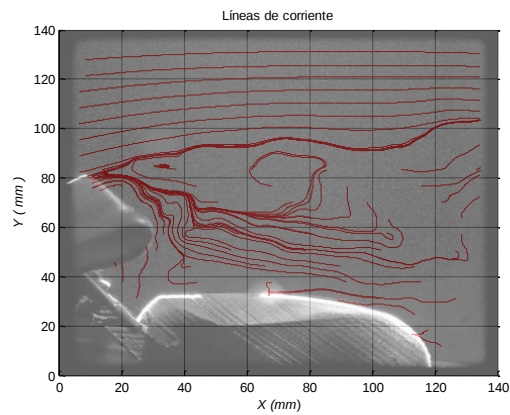


Figura 7.54: $2,4643 \times 10^4$

Nota: en el caso de las figuras 7.52, 7.53 y 7.54 no se puede decir que las líneas de corriente más próximas indican una mayor velocidad, ya que, para que sea posible la visualización de la recirculación en la zona superior al depósito ha sido necesario la representación de líneas de corriente no equidistantes.

7.4.3. Zona Asiento-Colín

- Para $Re = 1.1645 \times 10^5$

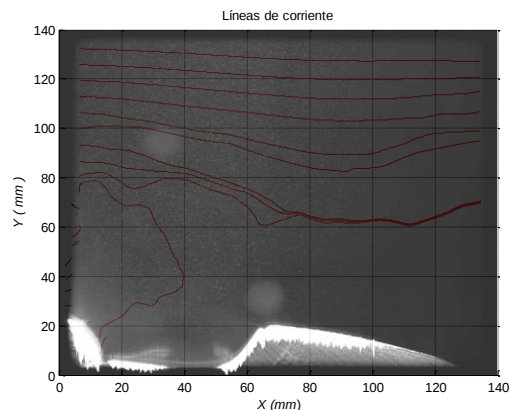


Figura 7.55

- Para $Re = 7,0464 \times 10^4$

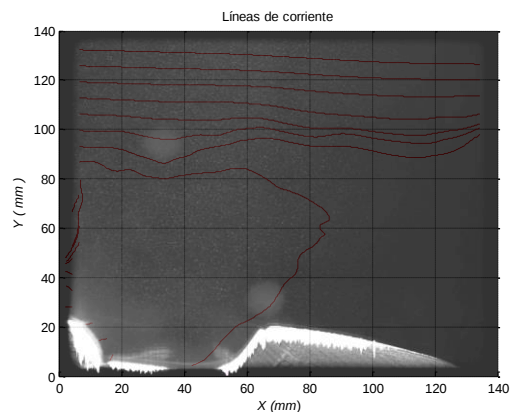


Figura 7.56

- Para $Re=2,4643 \times 10^4$

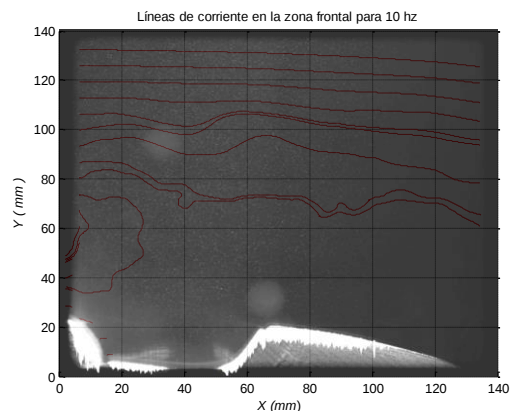


Figura 7.57

Si representamos algunas de las líneas de corriente del flujo de aire que se encuentra en la zona superior al asiento se obtiene:

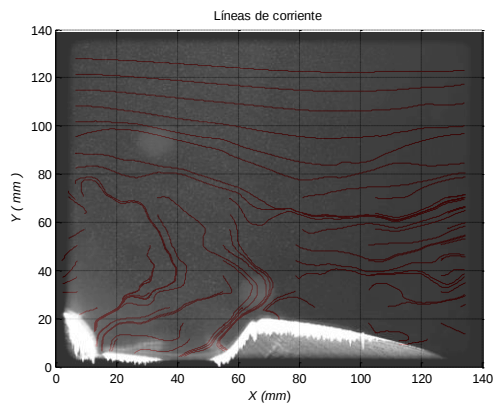


Figura 7.58: 1.1645×10^5

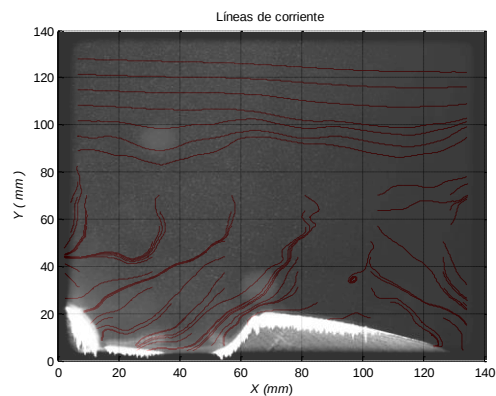


Figura 7.59: $7,0464 \times 10^4$

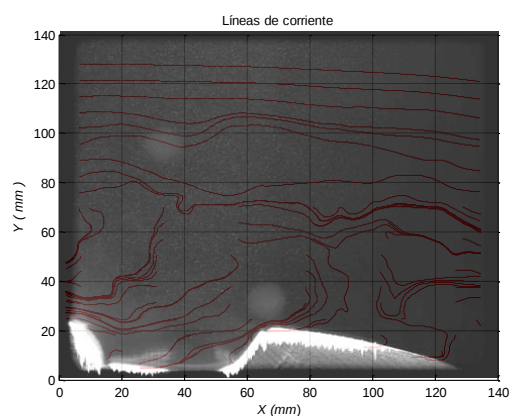


Figura 7.60: $2,4643 \times 10^4$

Nota: en el caso de las figuras 7.58, 7.59 y 7.60 no se puede decir que las líneas de corriente más próximas indican una mayor velocidad, ya que, para que sea posible la visualización de la recirculación en la zona superior al

depósito ha sido necesario la representación de líneas de corriente no equidistantes.

7.4.4. Zona final del Colín

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

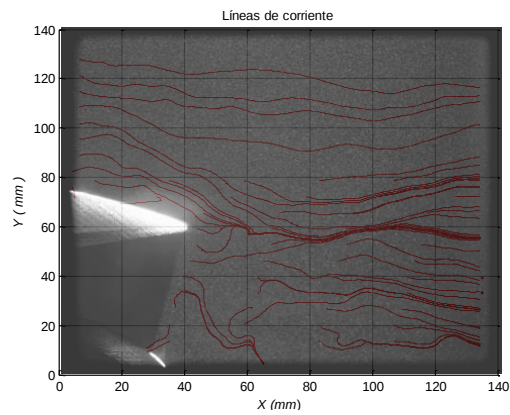


Figura 7.61

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

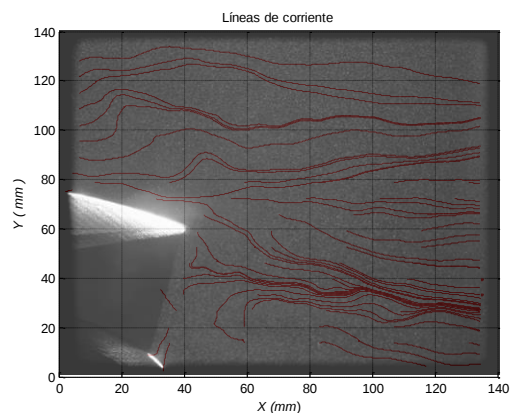


Figura 7.62

- Para $Re=2,4643 \times 10^4$

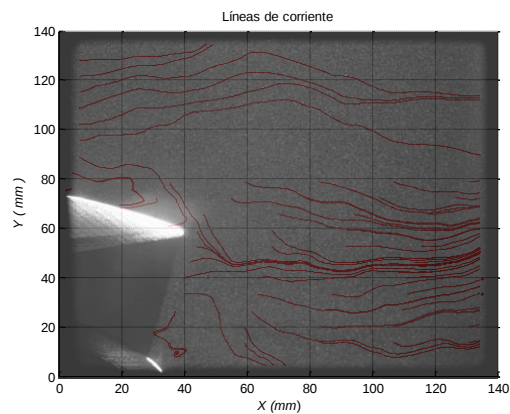


Figura 7.63

7.4.5. Zona lateral simétrica 1 (Plano laser a Z=162 mm)

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

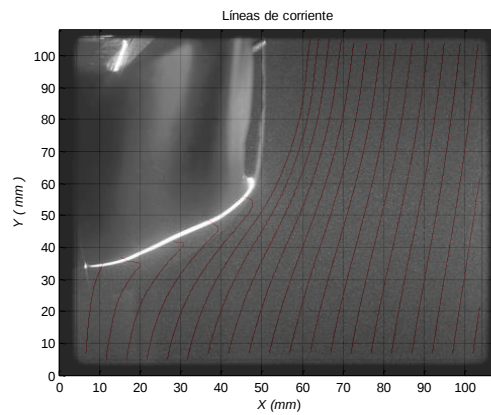


Figura 7.64

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

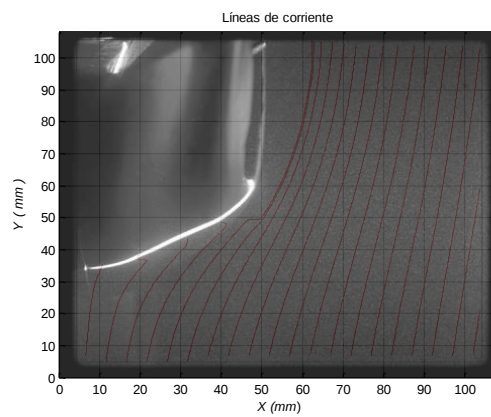


Figura 7.65

7.4.6. Zona lateral simétrica 2 (Z=162 mm)

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

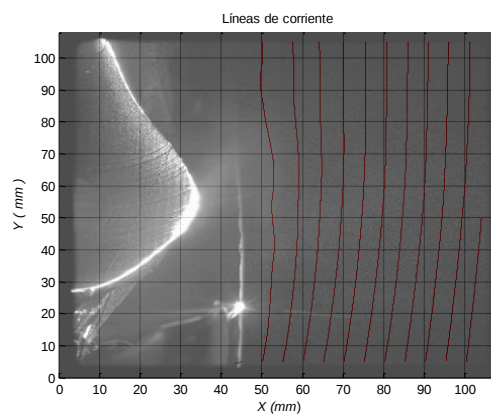


Figura 7.66

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

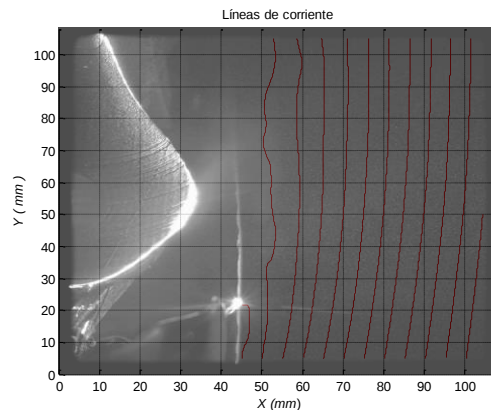


Figura 7.67

- Para $Re=2,4643 \times 10^4$

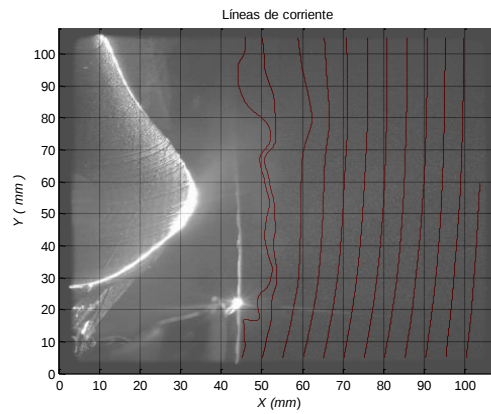


Figura 7.68

7.4.7. Zona lateral simétrica 3 (Z=162 mm)

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

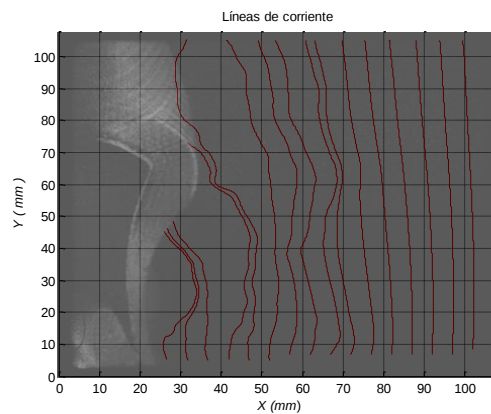


Figura 7.69

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

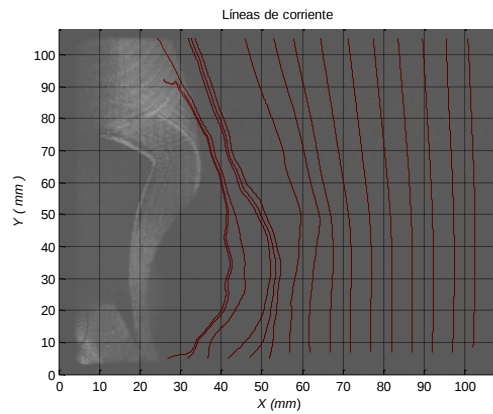


Figura 7.70

- Para $Re=2,4643 \times 10^4$

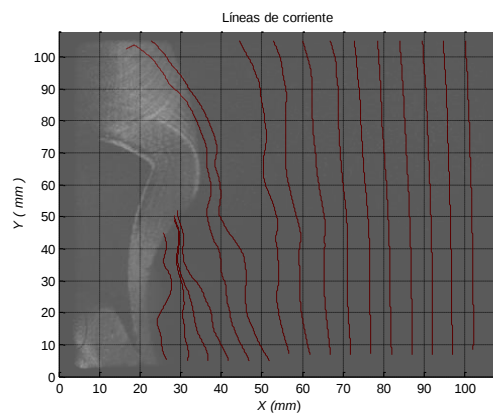


Figura 7.71

7.4.8. Zona lateral simétrica 4 (Z=162 mm)

- Para $Re=1.1645 \times 10^5$

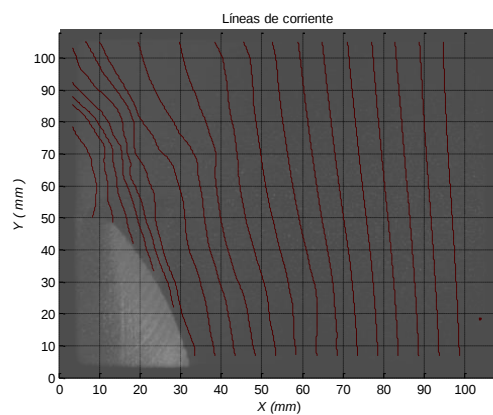


Figura 7.72

- Para $Re=7,0464 \times 10^4$

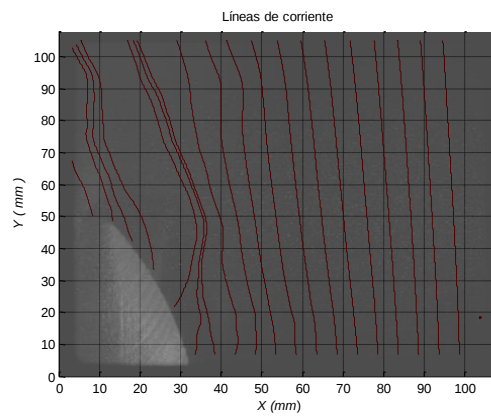


Figura 7.73

- Para $Re=2,4643 \times 10^4$

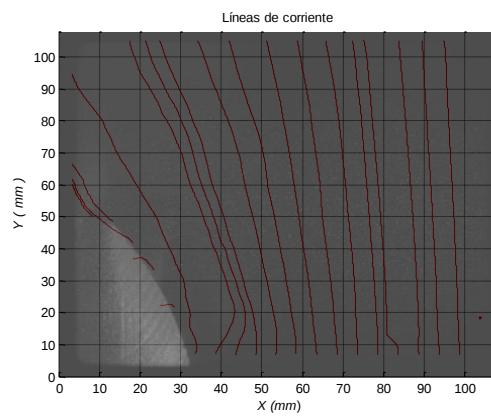


Figura 7.74

8 Conclusiones

En general, lo que se busca en estos tipos de vehículos en cuanto a aerodinámica se refiere, es un bajo coeficiente de arrastre y un retraso del desprendimiento de la capa límite. Es curioso ver como en cuanto a aerodinámica, en motocicletas se avanzó tanto hasta los años 50 y después se estancó la investigación debido al cambio en el reglamento de las competiciones. En la actualidad podemos ver motos que dejan mucho que desear a la aerodinámica, valorando más el diseño, aunque ésta pueda mejorar notablemente valores como el consumo o la velocidad del vehículo. Sin embargo, hay nuevos inventos que se abren paso, sobre todo en el área de la competición, que es la punta de lanza de la investigación en este campo, como son los difusores o los anteriormente estudiados airbox, mejorando las prestaciones de las motocicletas sin necesidad de un carenado excesivo.

La técnica de Velocimetría de imágenes de Partículas, PIV es una técnica de visualización cuantitativa, bien establecida y avalada por numerosos estudios tanto teóricos como experimentales, que hace posible la medida de la velocidad instantánea en un punto de una corriente de un fluido a partir de imágenes de partículas trazadoras que han sido iluminadas.

El objetivo de este proyecto ha sido investigar sobre la posibilidad de utilizar la técnica PIV en la determinación de la resistencia aerodinámica de una motocicleta, así como, en su análisis aerodinámico general.

El estudio teórico del problema, y el consiguiente planteamiento de las ecuaciones de balance correspondientes, llevó a la conclusión de que la determinación de la resistencia aerodinámica es equivalente a la determinación de la pérdida de cantidad de movimiento en la estela del cuerpo. El análisis dimensional permite reducir el problema al cálculo del coeficiente de resistencia C_D , el cual es únicamente función del Número de Reynolds. Este coeficiente debe determinarse experimentalmente y normalmente se hace a partir de ensayos sobre modelos (*pequeña escala*) que cumplan las condiciones de semejanza para que sean aplicables a los prototipos reales (*escala grande*).

El experimento a llevar a cabo consistía, básicamente, en la medida con un equipo PIV de la velocidad de partículas trazadoras arrastradas por un flujo de aire en el túnel.

De forma análoga al estudio experimental se ha realizado una simulación CFD, con el fin de comprobar la viabilidad de los resultados obtenidos en nuestro trabajo. Ambos estudios han confluído en varios aspectos, aunque el alto poder computacional requerido para la simulación no ha hecho posible una comparativa mucho más precisa entre ambas análisis que estudian un mismo comportamiento físico.

El empleo de la técnica PIV sería fácilmente extensible a estudios de estelas tridimensionales, lo que implicaría repetir el proceso expuesto para una serie de planos que cubriesen toda la zona de estela. Las modalidades tridimensionales de PIV están todavía en fase de laboratorio, pero en un futuro podrán aplicarse a una amplia variedad de estudios.

Con respecto al diseño de la moto podemos concluir de acuerdo al apartado 7.2 que:

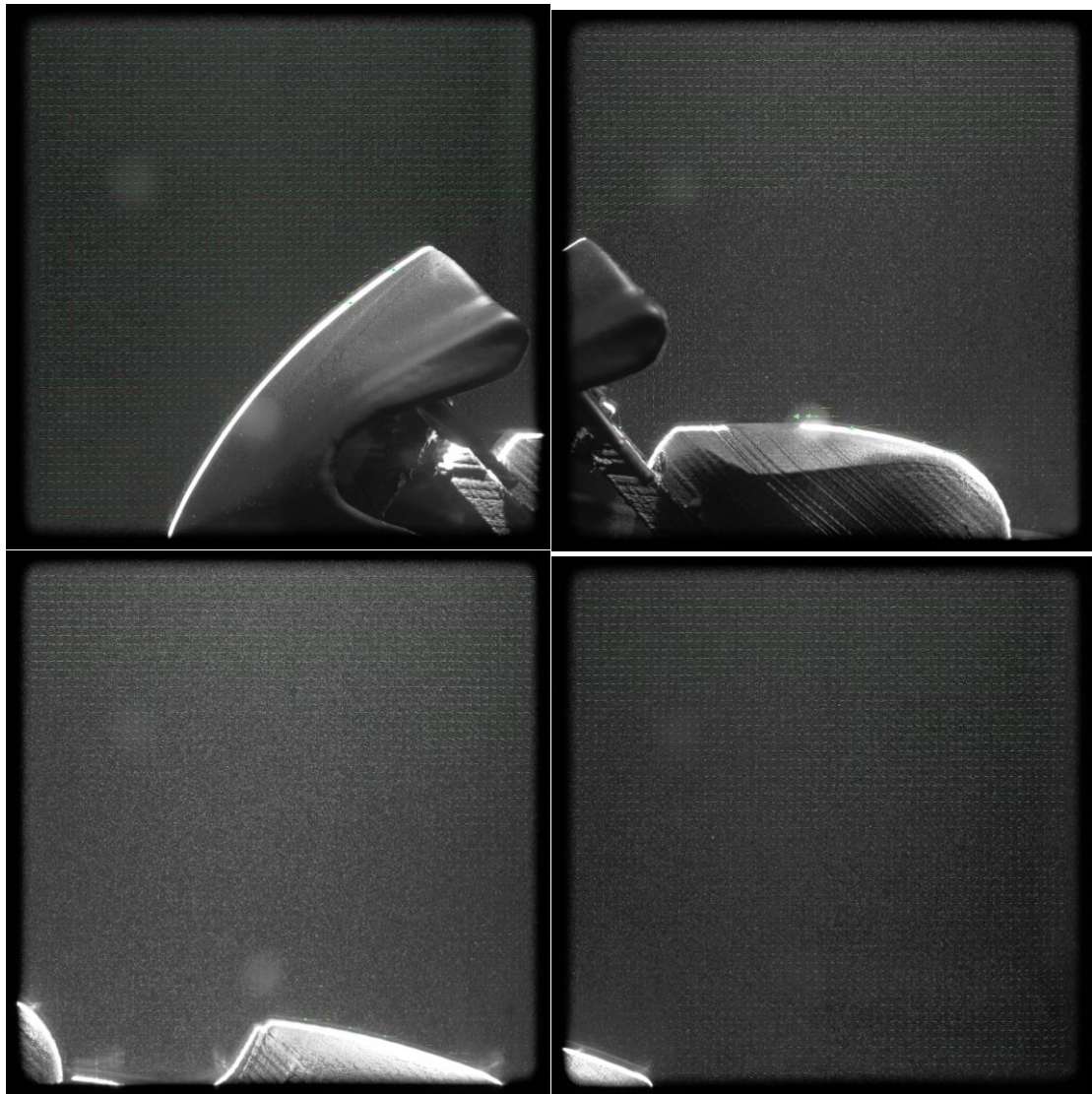
- La cúpula no tiene un buen porque produce una gran recirculación en la zona superior del asiento y un desprendimiento de la capa límite demasiado brusca para altos Re . También tiene un mal diseño en la zona lateral, ya que, la zona señalada en la figura 7.45 podría tener una curvatura más ligera eliminando de esta forma el gran gradiente de velocidades que se produce en la figura 7.46.
- El diseño del colín se puede considerar bueno dado que para altas velocidades de flujo no se producen recirculaciones de gran magnitud.

9 Anexos

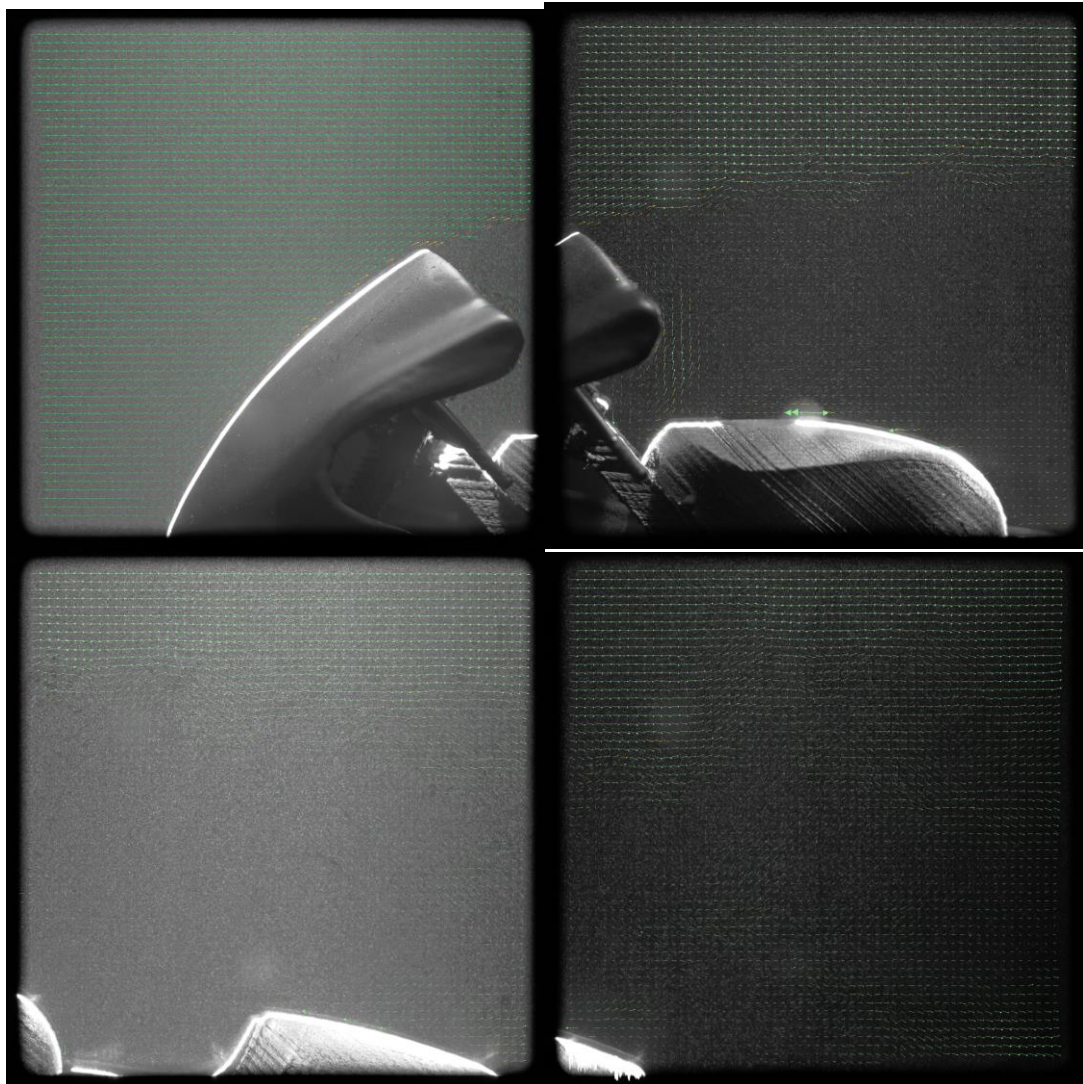
9.1 Fotografías del PIV

A continuación se muestran las imágenes obtenidas mediante la técnica del PIV del campo de velocidades alrededor del modelo, en el interior del túnel de viento, para distintas frecuencias de giro del ventilador.

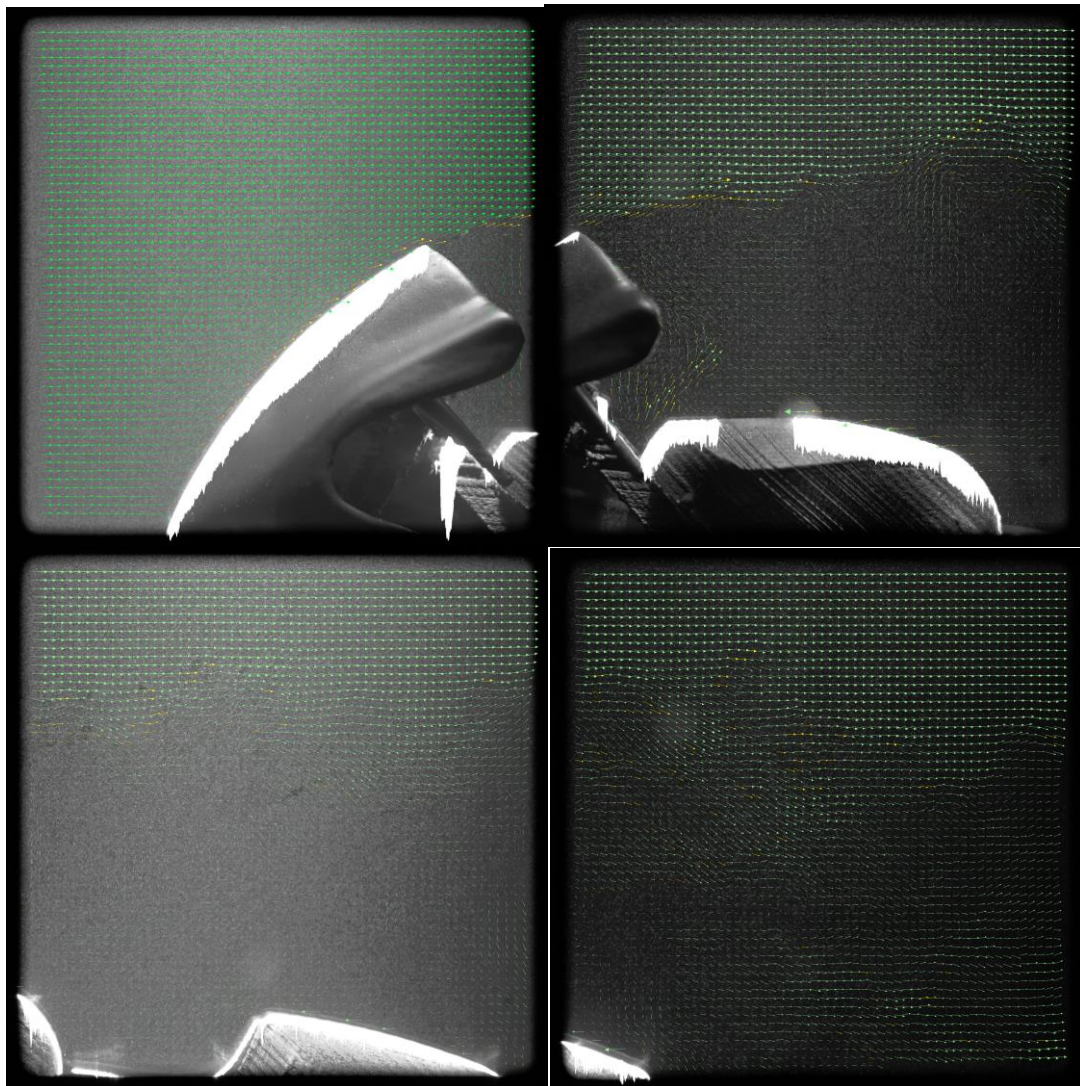
9.1.1-10 Hz lateral ($Re=2,4643 \times 10^4$)



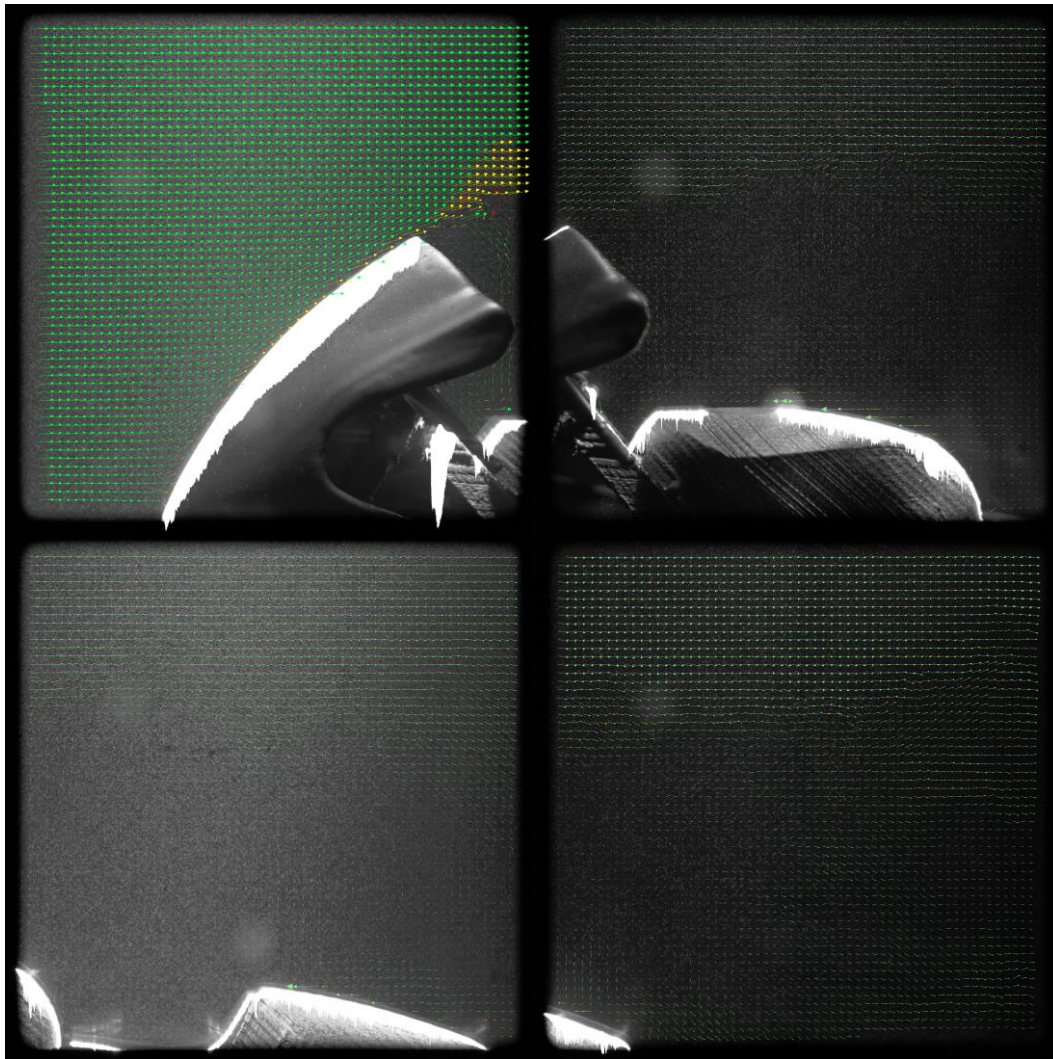
9.1.2-20 Hz lateral ($Re=4,944 \times 10^4$)



9.1.3-30 Hz lateral ($Re=7,0464 \times 10^4$)



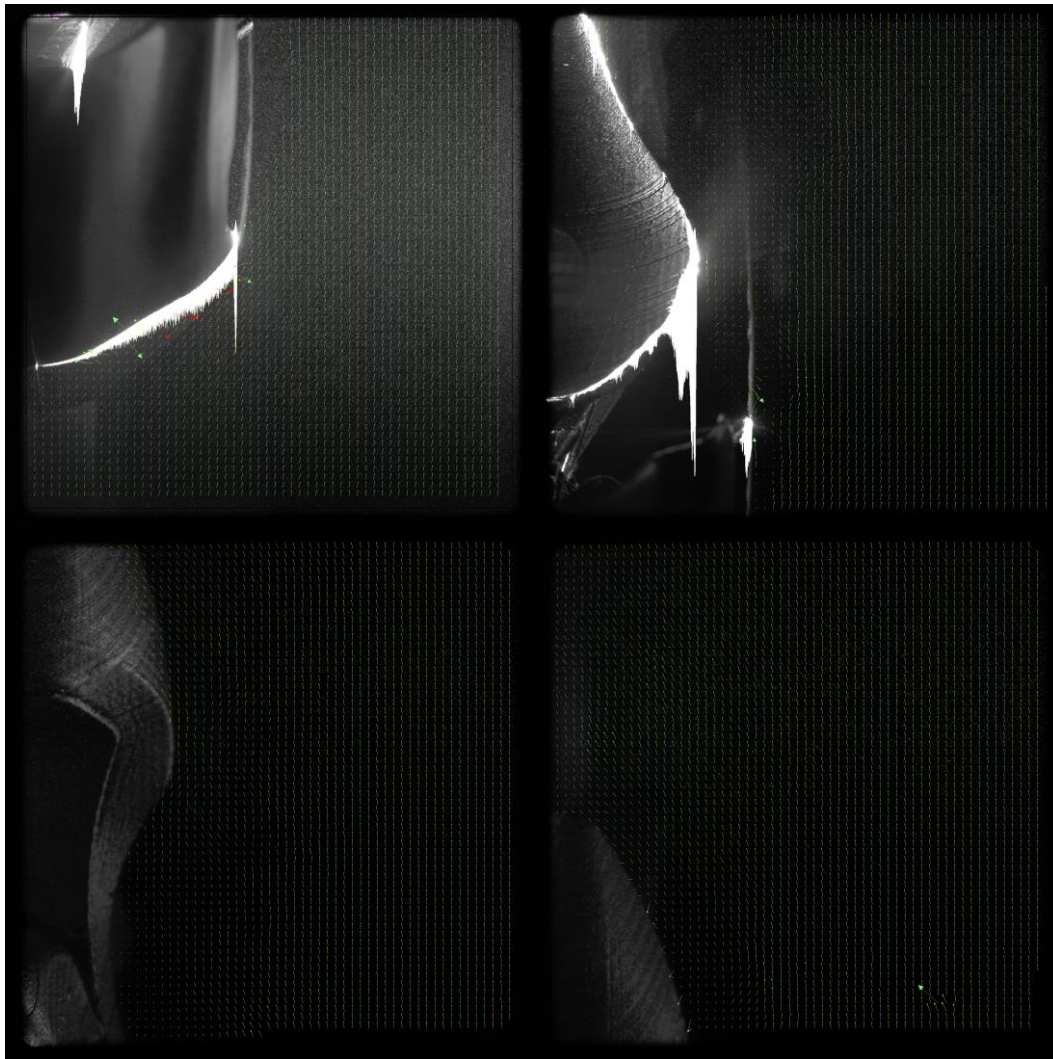
9.1.4-40 Hz lateral ($Re=9,1968 \times 10^4$)



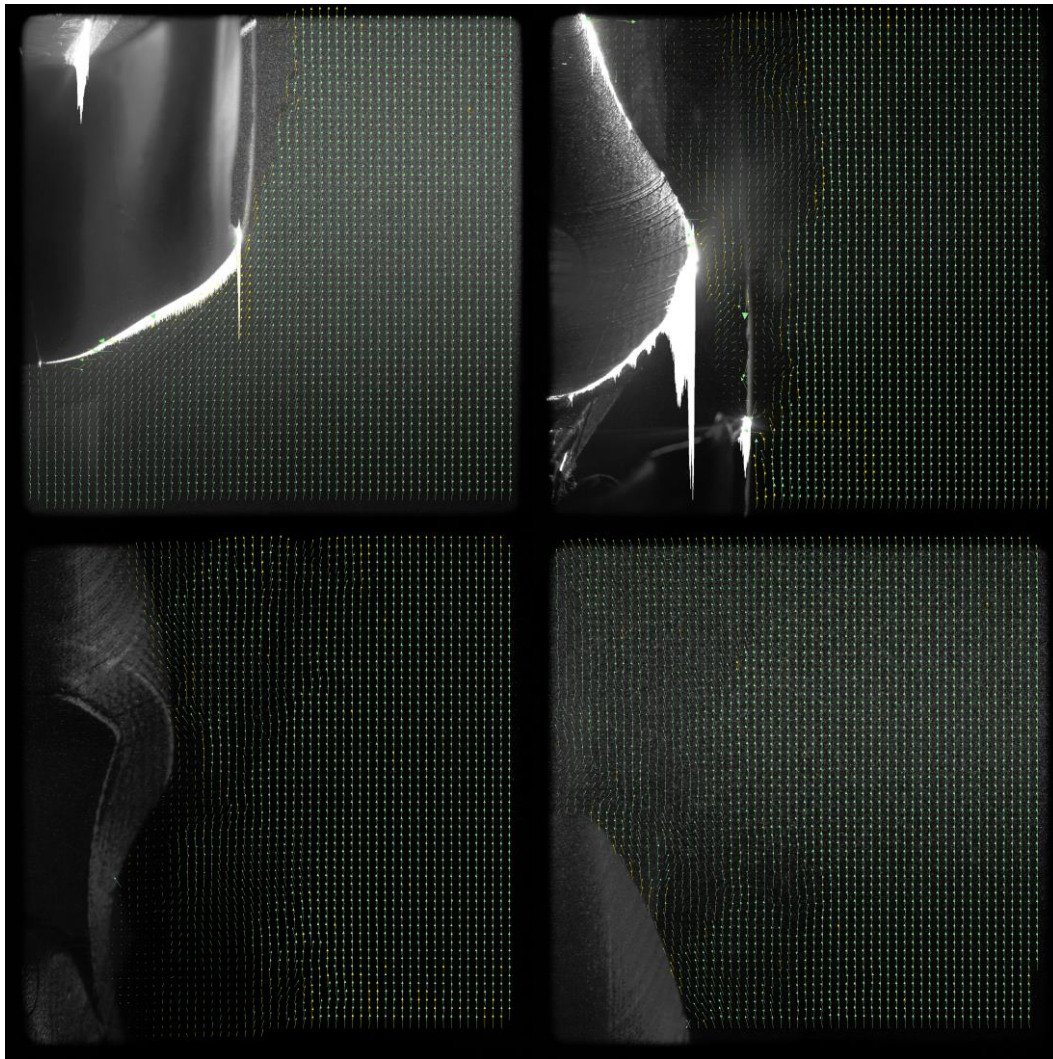
9.1.5-50 Hz lateral ($Re=1.1645 \times 10^5$)



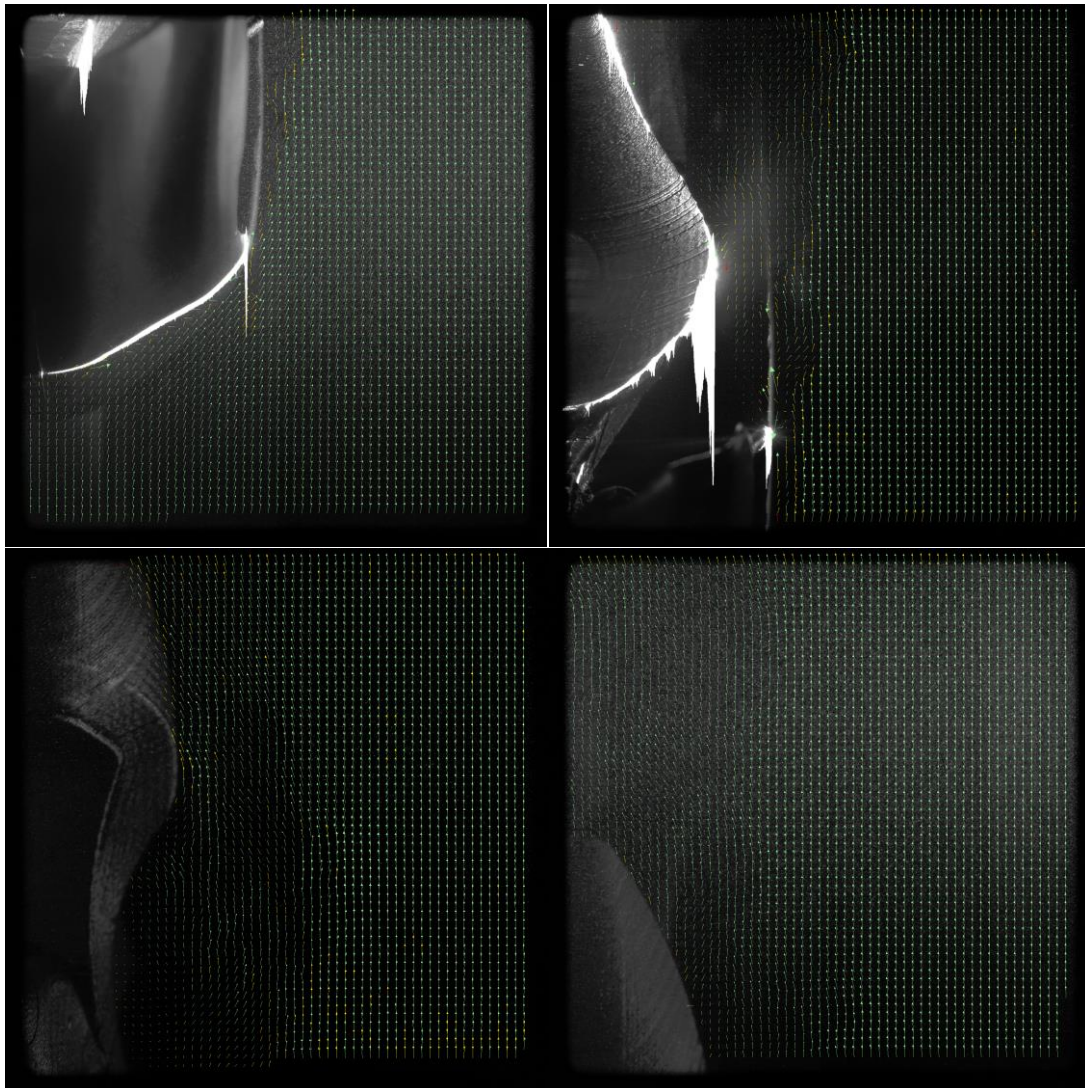
9.1.6-10 Hz desde arriba ($Re=2,4643 \times 10^4$)



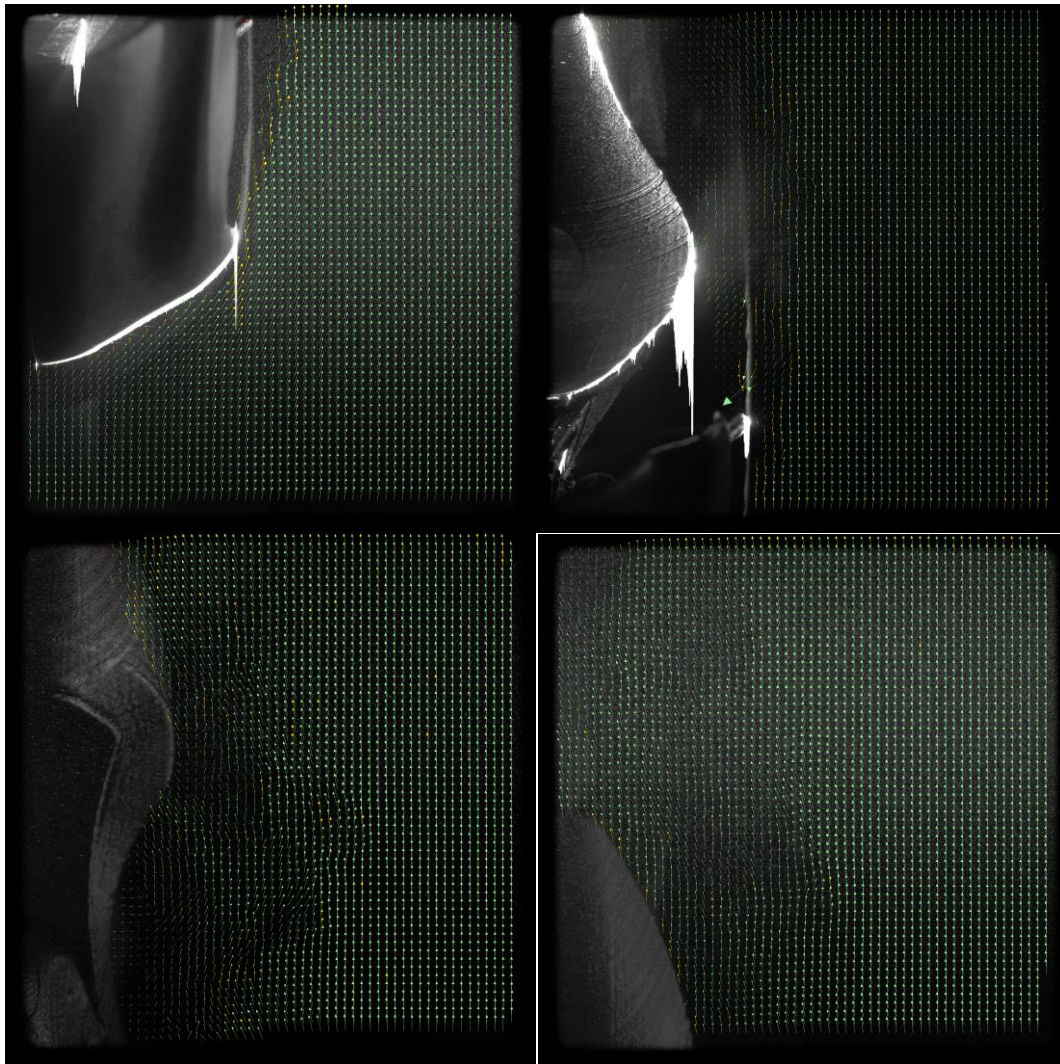
9.1.7-20 Hz desde arriba ($Re=4,944 \times 10^4$)



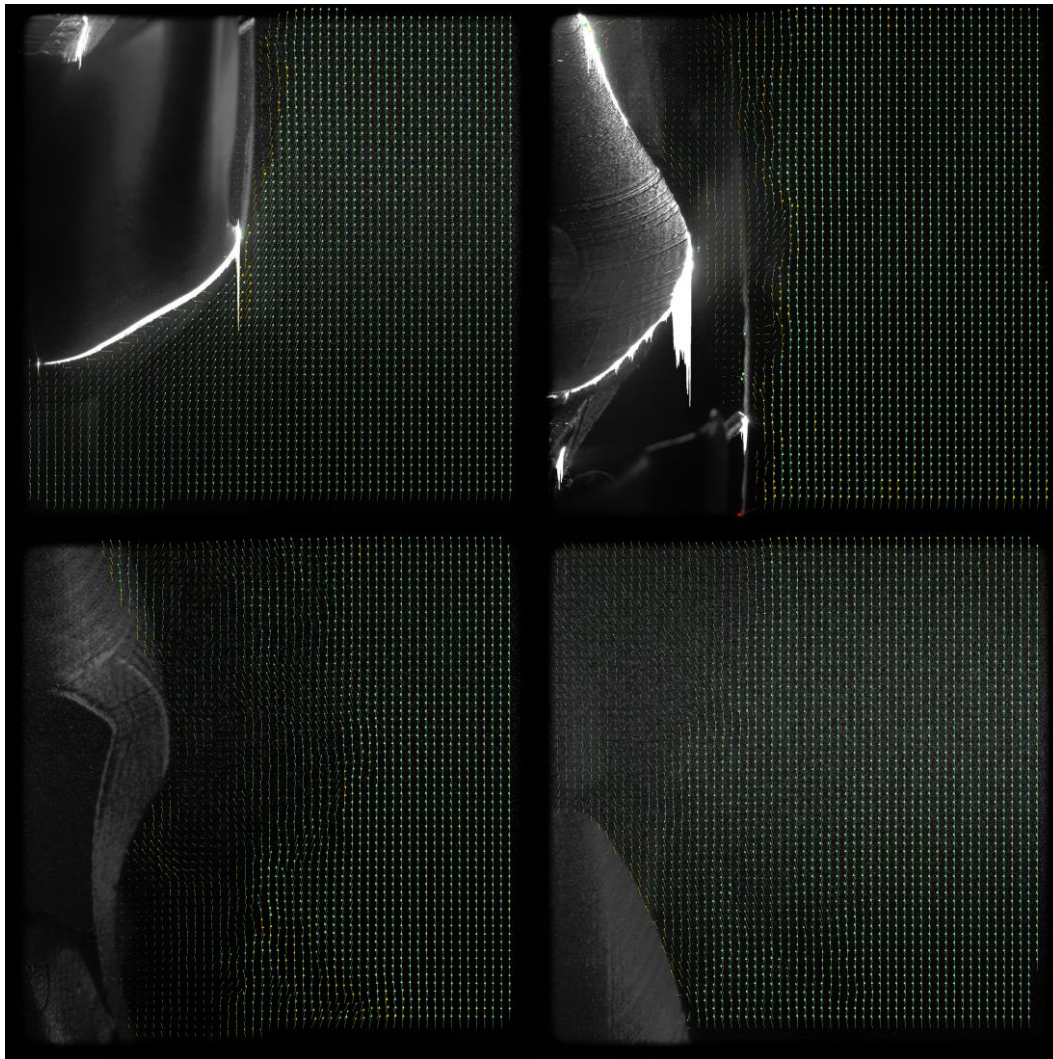
9.1.8-30 Hz desde arriba ($Re=7,0464 \times 10^4$)



9.1.9-40 Hz desde arriba ($Re=9,1968 \times 10^4$)



9.1.10-50 Hz desde arriba ($Re=1.1645 \times 10^5$)



9.2 ALGORITMOS DE MATLAB

- Función para ordenar vectores de menor a mayor

```
function vordenado=burbuja(vector)
tama=length(vector);
for cont1=1:tama
    for cont2=cont1+1:tama
        if vector(cont1)<vector(cont2)
            temp=vector(cont1);
            vector(cont1)=vector(cont2);
            vector(cont2)=temp;
        end
    end
end
vordenado=vector;
```

- Cálculo del coeficiente de resistencia, representación de las estelas y el campo de velocidades

```
close all
clear all

Uinf=25.6;
L=72;
nu=1.5*10^-5;

Re=(Uinf*L*10^-3)/nu;

% nombre: hace referencia al archivo .txt que se desea abrir. Los
valores obtenidos en las mediciones mediante el software INSIGHT 3G
eran guardados en un listado de datos en formato .vec. Para poder ser
interpretado por Matlab es necesario la conversión de este archivo a
una extensión .txt.
abre=('nombre.txt');

% Modo de apertura
run=dlmread(abre, ',', 1, 0);

for i=1:63
    xv(i)=run(i, 1);
end
yv=burbuja(xv);

X=meshgrid(xv, xv);
Y=meshgrid(yv, yv);
Y=Y';

tama=size(X);
cont1=1;
for j=1:tama
    for t=1:tama
        U(j, t)=run(cont1, 3);
        V(j, t)=run(cont1, 4);
        cont1=cont1+1;
    end
end
```

```
end

Um=U;
Vm=V;
Xm=X;
Ym=Y;

for s=1:tama
    for t=1:tama
        if U(s,t)==0 && V(s,t)==0
            Um(s,t)=NaN;
            Vm(s,t)=NaN;
            Xm(s,t)=NaN;
            Ym(s,t)=NaN;
        end
    end
end

U1=Vm;
V1=-Um;

for z=1:tama
    for o=tama:-1:1
        U2(z,tama-o+1)=U1(o,z);
        V2(z,tama-o+1)=V1(o,z);
    end
end

figure;
hold on
quiver(X,Y,U2,V2)
grid on
xlabel('\it X (mm)')
ylabel('\it Y ( mm )')
xlim([0 108])
ylim([0 108])
title(sprintf('Campo de velocidades a 1H para 50hz (Prueba 1, Re=%i)',Re));

cont4=1;
Cdt=0;
for col=5:57
    cont2=1;
    for r=1:tama
        for u=1:tama
            if u==col
                Uv(cont2)=U2(r,u);
                Vv(cont2)=V2(r,u);
                Yv(cont2)=Y(r,u);
                cont2=cont2+1;
            end
        end
    end
end

Xv=linspace(X(1,col),X(1,col),63);

figure;
hold on
quiver(Xv,Yv,Uv,Vv)
grid on
```

Diseño, fabricación y estudio aerodinámico experimental del carenado de una motocicleta de competición (Parte II)

```
xlabel('{\it X (mm)}')
ylabel('{\it Y ( mm )}')
xlim([0 108])
ylim([0 108])
title(sprintf('Perfil de velocidades de la estela a 1H para 50 hz
(Prueba 1, Re=%i)',Re));

Cd=0;
h=Yv(1)-Yv(2);
for z=3:61
    if z==3 || z==61
        u=Uv(z);
        Cdn=(2*h)/(2*L)*((Uinf-u)/Uinf);
        Cd=Cd+Cdn;
    else
        u=Uv(z);
        Cdn=(4*h)/(2*L)*((Uinf-u)/Uinf);
        Cd=Cd+Cdn;
    end
end

Cdt=Cdt+Cd;
cont4=cont4+1;
end
Cdm=Cdt/(cont4-1);
disp(['El valor del coeficiente de resistencia medio (Cd)
es:',num2str(Cdm)]);
```

▪ Representación del C_D frente al Re

```
close all
clear all

% Vectores con los datos de entrada.
vRe=[0.27381*10^5 0.54933*10^5 0.78293*10^5 1.02187*10^5 1.29387*10^5
2.93333*10^5 5.86667*10^5 8.8*10^5];
vCd=[0.4384 0.3567 0.3295 0.3161 0.3071 0.2912 0.2885 0.2884];

% Definimos un vector con 500 elementos, entre los dos Re extremo
entre los que representar la curva.
Re=linspace(0.1*10^5,10*10^5,500);

%Obtencion de los coeficientes de la ecuación parabólica
(interpolamos vCdm para valores de vRe)
pol=polyfit(vRe,vCd,4);

% Obtención de los coeficientes de resistencia, para cada uno de los
500 elementos que conforman el vector Re,
% a partir de los coeficientes de la ecuación parabólica.
Cd=polyval(pol,Re);

%Representación gráfica
figure;
plot(vRe,vCd,'ro',Re,Cd,'r')
legend('{\it Datos}','{\it Ajuste}',2)
grid on
ylabel('{\it C_d}')
xlabel('{\it Re}')
```

```
titulo=('{\it C_d=\phi(Re)}');  
title(titulo,'fontsize',14,'fontname','times new roman')
```

- Representación de los campos de velocidad y de las líneas de corriente

```
clear all  
  
for f=10:10:50  
  
% Abrir los archivos  
abre=[num2str(f), 'hz_medio.txt'];  
  
% Modo de apertura  
run=dlmread(abre, ',', 1, 0);  
  
for i=1:63  
xv(i)=run(i,1);  
end  
yv=burbuja(xv);  
  
X=meshgrid(xv,xv);  
Y=meshgrid(yv,yv);  
Y=Y';  
  
tama=size(X);  
cont1=1;  
for j=1:tama  
    for t=1:tama  
        U(j,t)=run(cont1,3);  
        V(j,t)=run(cont1,4);  
        cont1=cont1+1;  
    end  
end  
  
cont3=1;  
for l=29:-3:1  
    cont2=1;  
    while cont2<=tama  
        if U(l,cont2)~=0 || V(l,cont2)~=0  
            num1=X(l,cont2);  
            num2=Y(l,cont2);  
            sx1(cont3)=num1(1);  
            sy1(cont3)=num2(1);  
            cont2=tama;  
            cont3=cont3+1;  
        end  
        cont2=cont2+1;  
    end  
end  
  
Um=U;  
Vm=V;  
Xm=X;  
Ym=Y;  
  
for s=1:tama  
    for t=1:tama
```

```
        if U(s,t)==0 && V(s,t)==0
            Um(s,t)=NaN;
            Vm(s,t)=NaN;
            Xm(s,t)=NaN;
            Ym(s,t)=NaN;
        end
    end
end

figure;
hold on
quiver(Xm,Ym,Um,Vm)
o=streamline(X,Y,U,V,sx1,sy1);
set(o,'Color','red')
grid on
xlabel('\it X (mm)')
ylabel('\it Y ( mm )')
title(sprintf('Líneas de corriente en la zona frontal para %i
hz',f));

end
```

▪ Representación de los contornos de velocidad

```
close all
clear all

cont4=1;
Uinf=[5.134 10.3 14.68 19.16 24.26];
L=72;
nu=1.5*10^-5;

for f=10:10:50

    % Abrir los archivos
    abre=[num2str(f), 'hz_colín.txt'];

    % Modo de apertura
    run=dlmread(abre, ',',1,0);

    for i=1:63
        xv(i)=run(i,1);
    end
    yv=burbuja(xv);

    X=meshgrid(xv,xv);
    Y=meshgrid(yv,yv);
    Y=Y';

    tama=size(X);
    cont1=1;
    for j=1:tama
        for t=1:tama
            U(j,t)=run(cont1,3);
            V(j,t)=run(cont1,4);
            %VelM(j,t)=sqrt(run(cont1,3)^2+run(cont1,4)^2);
            VelX(j,t)=run(cont1,3);
            VelY(j,t)=run(cont1,4);
```

```
        cont1=cont1+1;
    end
end

cont3=1;
for l=29:-3:1
    cont2=1;
    while cont2<=tama
        if U(l,cont2)~=0 || V(l,cont2)~=0
            num1=X(l,cont2);
            num2=Y(l,cont2);
            sx1(cont3)=num1(1);
            sy1(cont3)=num2(1);
            cont2=tama;
            cont3=cont3+1;
        end
        cont2=cont2+1;
    end
end

Re=(Uinf(cont4)*L*10^-3)/nu;

figure;
contourf(X,Y,VelX,50)
xlabel('\it X (mm)')
ylabel('\it Y ( mm )')
title(sprintf('u(m/s)'));

figure;
contourf(X,Y,VelY,50)
xlabel('\it X (mm)')
ylabel('\it Y ( mm )')
title(sprintf('v(m/s)'));

if f==50
    figure;
    contourf(X,Y,VelX,50)
    xlabel('\it X (mm)')
    ylabel('\it Y ( mm )')
end

cont4=cont4+1;
end
```

Bibliografía

- Motorcycle handling and chasis desing, the art and science (Tony Foales)
- www.wikipedia.org
- Estudio y optimización del flujo alrededor del colín de una moto de competición (Santiago Díaz)
- ISIGHT 3G PIV tutorial (TSI)
- Aplicación del PIV a la medida del coeficiente de resistencia aerodinámica (Rafael Bardera Mora)
- Estudio de la reducción de consumo de combustible de vehículo terrestre de 5,5 toneladas mediante el uso de cobertores aerodinámicos (Gerardo Javier Rojas Zevallos)
- Mesa PIV Laser, manual (TSI)
- Laserpulse light model 610015, manual (TSI)
- Powerview CCD cameras, manual (TSI)
- Laserpulse synchronizer model 610035, manual (TSI)
- http://help.solidworks.com/2012/Spanish/SolidWorks/sldworks/HIDD_STL.htm
- <http://meshlab.sourceforge.net/>
- http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/es-es/fileio/stereolithography_stl_import_export.htm
- http://docs.mcneel.com/rhino/5/help/es-es/fileio/wavefront_obj_import_export.htm
- http://wiki.blender.org/index.php/Doc:ES/2.4/Manual/Textures/UV/Unwrapping_a_Mesh
- <http://openfoamwiki.net/images/f/f0/Final-AndrewJacksonSlidesOFW7.pdf>
- <http://www.openfoam.org/docs/user/blockMesh.php>
- Ingeniería fluidomecánica. Ed: Paraninfo. Universidad de Jaén. Autores: Marcos Vera Coello, Immaculada Iglesias Estradé, Antonio L. Sánchez Pérez y Carlos Martínez Bazán.
- Tesis doctoral: Aplicación del PIV a la medida del coeficiente de resistencia aerodinámica. Rafael Bardera Mora.
- Estudio de la frecuencia critica del airbox perteneciente a la moto 2. Carmen Fernández Pastor.