



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 I)**

Alumno: Carlos García Baena

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

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2014

Agradecimientos

Agradecer a nuestros 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 Procesos de fabricación.....	6	
2.1 Mecanizado por arranque de viruta (fresado).....	6	
2.1.1 Tipos de fresado.....	7	
2.1.2 Parámetros de mecanizado.....	10	
2.1.3 Fuerzas de corte, momento torsor y potencia.....	12	
2.1.4 Fresadoras según el número de ejes	14	
2.2 Termoconformado por vacío ..	15	
2.2.1 Etapas.....	15	
2.2.2 Parámetros.....	16	
2.2.3 Termoconformado al vacío directo	16	
2.3 Prototipado rápido (modelado por deposición de fundente)	18	
2.3.1 Aplicaciones.....	21	
2.3.2 Uso doméstico.....	22	
3 Aerodinámica en motocicletas.....	23	
3.1 Resistencia aerodinámica.	23	
3.2 Sustentación	32	
3.5 Evaluación de prestaciones....	38	
4 Fabricación	39	
4.1 Diseño para fabricación de la geometría (CAD)	39	
4.2 Diseño CAD de los moldes	41	
4.3 Diseño del proceso de mecanizado.....	43	
4.4 Mecanizado	54	
4.5 Termoconformado.....	56	
4.6 Impresión 3D	62	
4.6.1 Generación del archivo CAD para impresión (STL).....	64	
4.6.2 Preparación de la impresión y obtención del código ISO.....	66	
4.7 Ensamblaje del conjunto y pegado.....	74	
5 Ensayos en el túnel de viento	77	
5.1 El túnel de viento	77	
5.1.1 Cómo funciona un túnel de viento.....	77	
5.1.2 Teoría de empleo de los túneles de viento	78	
5.1.3 Clasificación de los túneles de viento.....	79	
5.1.4 Composición general de los túneles de viento	80	
5.1.5 Problemas y pérdidas en un túnel de viento.....	83	
5.1.6 Parámetros de las instalaciones de ensayo.....	84	
5.2 Calibración del túnel de viento	84	
5.2.1 Anemometría de hilo caliente....	84	
5.2.2 Calibración de la sonda.....	91	
5.2.3 Calibración del túnel de viento.....	96	
6 Conclusiones.....	101	
6.1 Fabricación	101	
6.2 Túnel de viento	102	
7 Anexos.....	103	
7.1 Planos.....	103	
8 Bibliografía	108	

1 Introducción

De todos los medios utilizados en la industria aeronáutica, el túnel aerodinámico es con diferencia el mas importante, sin el la aviación actual aún seguiría siendo un sueño.

El primer túnel aerodinámico lo invento en 1871 Francis Herbert Wenham, un ingeniero naval que estaba fascinado por la idea del vuelo a motor. Wenham utilizo un ventilador impulsado por vapor para forzar la circulación de aire sobre un modelo de ala montado sobre una balanza aerodinámica en una cámara de tres metros de largo y 40x40 cm².

Mediante las lecturas de la balanza aerodinámica, podía medir con precisión la fuerza de sustentación generada por el ala. En contra de la teoría generalizada respecto al vuelo, la fuerza de sustentación resultaba ser mucho mayor que la resistencia al avance, haciendo que el vuelo con motor pareciera más posible que nunca.

Más de tres décadas después, los hermanos Wright utilizaron un túnel aerodinámico, diseñado por ellos mismo, para comprobar 200 planos aerodinámicos antes de construir y hacer volar su aeronave pionera en 1903. Los túneles aerodinámicos se han usado desde entonces para analizar los conceptos aeronáuticos y detectar defectos de diseños.

El que modelos probados en los túneles viento den una previsión exacta del futuro comportamiento de los aviones en vuelo se debe a gran medida a una formula ideada en 1883 por el físico británico Osborne Reynolds. El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de la dinámica de fluidos. Para conseguir resultados exactos en los túneles aerodinámicos, el número de Reynolds del modelo de prueba debe ser igual al del avión a escala real, éste es el principio básico del análisis de los modelos a escala en un túnel de viento.

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad [1.1]$$

La solución más directa para el análisis aerodinámico de modelos en un túnel de viento, es construir enormes túneles con modelos a escala real, sin embargo, este sistema resulta extremadamente costoso. Con el fin de evitar este gasto, se suelen utilizar túneles aerodinámicos mas modestos y modelos a pequeña escala para después aumentar el numero de Reynolds en el túnel, presurizando el aire o enfriándolo para aumentar su densidad. Otra solución puede ser el empleo de un gas mas denso (nitrógeno o freón) en vez de aire. Combinando estas técnicas, se pueden crear unas condiciones en el túnel aerodinámico que imitan las condiciones de vuelo reales de un avión de tamaño natural.

El uso de modelos a escala para su estudio aerodinámico no es exclusivo de la industria aeronáutica, los fabricantes de vehículos terrestres han dado más importancia a la aerodinámica en los últimos años, debido a sus innegables beneficios, esto ha hecho que los túneles aerodinámicos hayan sido más demandados. En la actualidad se simulan los modelos a escala por ordenador mediante técnicas de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) antes de fabricarlos, consiguiendo así un mejor diseño del modelo para su análisis en el túnel.

En esta parte del proyecto, nos centraremos en la creación de un modelo a escala de una motocicleta de competición de 250 cc, diseñada en la Universidad de Jaén por el EPSUJATeam, detallando la construcción del modelo, en el que se han usado métodos de fabricación diversos, como son el mecanizado, el termoconformado y la impresión 3D. En la segunda parte de este proyecto, se ensayará el modelo a escala en un túnel de viento a distintas velocidades, para comparar los datos obtenidos con un modelo por ordenador, simulado mediante OpenFOAM. El objetivo es obtener un modelo funcional para la experimentación de posibles mejoras aerodinámicas en el carenado de la motocicleta, además de introducirnos en el uso de los distintos métodos de fabricación, además del análisis del PIV en el túnel de viento y las simulaciones de fluidos por ordenador (CFD).

2 Procesos de fabricación

Un proceso industrial es el conjunto de operaciones unitarias necesarias para modificar las características de las materias primas. Dichas características pueden ser de naturaleza muy variada tales como la forma, la densidad, la resistencia, el tamaño o la estética. Para la obtención de un determinado producto, serán necesarias multitud de operaciones individuales, de modo que se denomina proceso al conjunto de operaciones desde la extracción de los recursos naturales necesarios hasta la venta del producto definitivo.

En este apartado se verá una descripción general de los métodos que se utilizarán para la fabricación del modelo a escala.

2.1 Mecanizado por arranque de viruta (fresado)

El mecanizado es un proceso mecánico que consiste en la fabricación de piezas de gran precisión. El método se basa en el arranque de material de un bloque inicial de materia prima, mediante una herramienta, hasta la obtención de la geometría de la pieza final. En el mecanizado por arranque de viruta, el material es arrancado o cortado con una herramienta dando lugar a un desperdicio o viruta. La herramienta consta, generalmente, de uno o varios filos o cuchillas que separan la viruta de la pieza en cada pasada. En el mecanizado por arranque de viruta se dan procesos de desbaste (eliminación de mucho material con poca precisión) y de acabado (eliminación de poco material con mucha precisión, proceso final cuyo objetivo es el de dar el acabado superficial que se requiera a las distintas superficies de la pieza). Un gran inconveniente de este método, es la gran cantidad de material que se desperdicia en el proceso en forma de viruta, además de la larga duración de estos procesos.

La fresadora es una máquina dotada de una herramienta característica, denominada fresa, que animada de un movimiento de rotación, mecaniza superficies en piezas que se desplazan con movimiento rectilíneo bajo la herramienta.

Si el eje de la fresa se halla dispuesto paralelamente a la superficie a mecanizar, el fresado se denomina cilíndrico. En este caso, la fresa puede girar en sentido contrario al avance, denominándose fresado normal o en el mismo sentido, que es el fresado en concordancia.



Figura 2.1: fresado cilíndrico y fresado frontal

Cuando el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de la pieza que se mecaniza, el fresado se denomina frontal (figura 2.1). Los movimientos de trabajo de la fresadora son:

- **Movimiento de corte:** por rotación de la fresa.
- **Movimiento de avance:** por desplazamiento rectilíneo de la pieza.
- **Movimiento de profundidad de pasada:** por desplazamiento vertical de la pieza.

Actualmente, la fresadora tiene un campo de aplicación para el mecanizado de piezas pequeñas casi ilimitado, y como además se pueden equipar con dispositivos de fresado, las cepilladoras, las mandrinadoras, etc, el fresado como operación se ha extendido a la mecanización de piezas de cualquier tamaño.

Las fresadoras tienen mucho mayor rendimiento que las demás máquinas herramientas para la misma operación, pues como cada diente o arista de la fresa no está en fase de trabajo y, por tanto, en contacto con la pieza más que una fracción del tiempo que dura una revolución de la fresa, experimenta ésta menos fatiga, tiene menor desgaste y trabaja a temperatura inferior que las cuchillas de los tornos, sin que pueda considerarse su trabajo intermitente, ya que siempre hay una arista de la fresa en fase de trabajo.

2.1.1 Tipos de fresado

- **Planeado:** La aplicación más frecuente de fresado es el planeado, que tiene por objetivo conseguir superficies planas. Para el planeado se utilizan generalmente fresas de planear de plaquitas intercambiables de metal duro, existiendo una gama muy variada de diámetros de estas fresas y del número de plaquitas que monta cada fresa. Los fabricantes de plaquitas recomiendan como primera opción el uso de plaquitas redondas o con ángulos de 45° como alternativa.



Figura 2.2: fresa de planeado (www.izaro.com)

- **Fresado en escuadra:** El fresado en escuadra es una variante del planeado que consiste en dejar escalones perpendiculares en la pieza que se mecaniza. Para ello se utilizan plaquitas cuadradas situadas en el portaherramientas de forma adecuada.
- **Cubicaje.** La operación de cubicaje es muy común en fresadoras verticales u horizontales y consiste en preparar los tarugos de metal u otro material como mármol o granito en las dimensiones cúbicas adecuadas para operaciones posteriores. Este fresado también se realiza con fresas de planear de plaquitas intercambiables.
- **Corte.** Una de las operaciones iniciales de mecanizado que hay que realizar consiste muchas veces en cortar las piezas a la longitud determinada partiendo de barras y perfiles comerciales de una longitud mayor. Para el corte industrial de piezas, se utilizan indistintamente sierras de cinta o fresadoras equipadas con fresas cilíndricas de corte. Lo significativo de las fresas de corte es que pueden ser de acero rápido o de metal duro. Se caracterizan por ser muy delgadas (del orden de 3 mm aunque puede variar), tener un diámetro grande y un dentado muy fino.
- **Ranurado recto:** Para el fresado de ranuras rectas se utilizan generalmente fresas cilíndricas con la anchura de la ranura y a menudo, para aumentar la producción, se montan varias fresas en el eje portafresas permitiendo aumentar la productividad de mecanizado. Al montaje de varias fresas cilíndricas se le denomina tren de fresas o fresas compuestas. Las fresas cilíndricas se caracterizan por tener tres aristas de corte: la frontal y las dos laterales. En la mayoría de aplicaciones se utilizan fresas de acero rápido ya que las de metal duro son muy caras y por lo tanto solo se emplean en producciones muy grandes.



Figura 2.3: fresa de ranurado (www.accesorios-carpintería.com)

- **Copiado:** Para el fresado en copiado se utilizan fresas con el perfil de plaquita redondo a fin de poder realizar operaciones de mecanizado en orografías y perfiles de caras cambiantes.
- **Fresado de cavidades:** En este tipo de operaciones se aconseja realizar un taladro previo y a partir del mismo y con fresas adecuadas abordar el mecanizado de la cavidad teniendo en cuenta que los radios de la cavidad deben ser al menos un 15% superior al radio de la fresa.
- **Torno-fresado:** Este tipo de mecanizado utiliza la interpolación circular en fresadoras de control numérico y sirve tanto para el torneado de agujeros de precisión como para el torneado exterior. El proceso combina la rotación de la pieza y de la herramienta de fresar siendo posible conseguir una superficie cilíndrica. Esta superficie puede ser concéntrica respecto a la línea central de rotación de la pieza, o puede ser excéntrica si se desplaza el fresado hacia arriba o hacia abajo. Con el desplazamiento axial es posible alcanzar la longitud requerida.
- **Fresado de roscas:** El fresado de roscas requiere una fresadora capaz de realizar interpolación helicoidal simultánea en dos grados de libertad: la rotación de la pieza respecto al eje de la hélice de la rosca y la traslación de la pieza en la dirección de dicho eje.

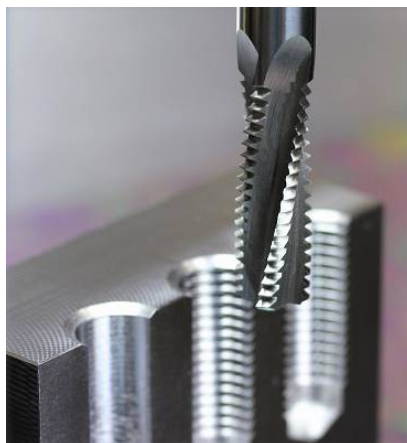


Figura 2.4: fresado de roscas (www.interempresas.net)

- **Fresado frontal:** Consiste en el fresado que se realiza con fresas helicoidales cilíndricas que atacan frontalmente la operación de fresado. En las fresadoras de control numérico se utilizan cada vez más fresas de metal duro totalmente integrales que permiten trabajar a velocidades muy altas.

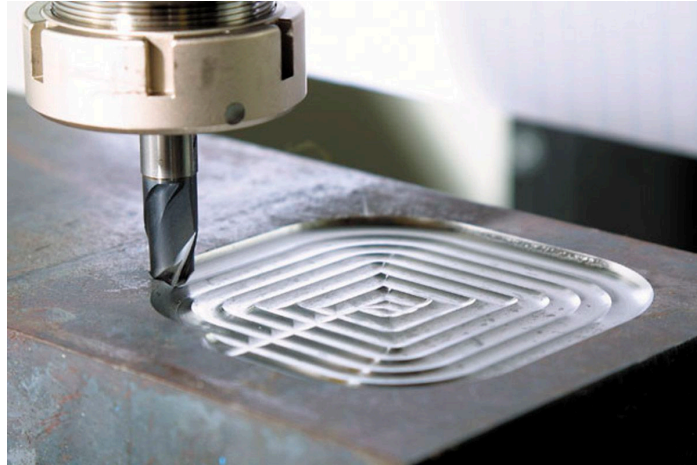


Figura 2.5: fresado frontal (www.directindustry.es)

- **Fresado de engranajes:** El fresado de engranajes apenas se realiza ya en fresadoras universales mediante el plato divisor, sino que se hacen en máquinas especiales llamadas talladoras de engranajes y con el uso de fresas especiales del módulo de diente adecuado.
- **Fresado en rampa:** Es un tipo de fresado habitual en el mecanizado de moldes que se realiza bien con fresadoras copiadoras o bien con fresas de control numérico.

2.1.2 Parámetros de mecanizado

Los ángulos de afilado de los dientes de las fresas dependen del tipo de fresa, de su material y del material a mecanizar.

Respecto a las velocidades de corte, son mayores que las de ninguna otra herramienta, pues dichas velocidades están sólo limitadas por el calentamiento de la herramienta, y las fresas se calientan menos, porque sólo trabajan los dientes en una fracción de su rotación, enfriándose en contacto con el aire el resto de ella.

Estas velocidades dependen también del material de las fresas y del material a mecanizar. Si se desea obtener las velocidades en revoluciones por minuto partiendo de las velocidades de corte lineales, puede utilizarse la fórmula siguiente, de fácil deducción:

$$n = \frac{1000 * v}{\pi * D} \quad [2.1]$$

El avance depende también del material de la fresa y del de la pieza que se mecaniza.

Material	Velocidad corte v(m/min)		Velocidad avance a (mm/min)
	Desbaste	Acabado	
Cobre y aluminio	40-50	50-60	40-60
Bronce común	15-28	20-22	40
Acero dulce	10-12	13-15	28
Acero semiduro	8-10	10-12	20
Acero duro	5-6	6-12	13
Acero muy duro	4-5	5-6	12
Fundición gris	3-4	4-5	10

Tabla 2.1: velocidades para fresas de acero al carbono (www.serina.es)

Material	Velocidad corte v(m/min)		Velocidad avance a (mm/min)
	Desbaste	Acabado	
Cobre y aluminio	60-80	80-100	80-120
Bronce común	25-28	35-40	80
Acero dulce	16-20	25-30	60
Acero semiduro	12-16	18-22	30
Acero duro	10-15	16-18	25
Acero muy duro	8-12	13-15	20
Fundición gris	12-15	18-20	45

Tabla 2.2: velocidades para fresas de metal duro (www.serina.es)

Material	kg/mm ²
Acero dulce	170-125
Acero semiduro	210-155
Acero duro	300-232
Fundición gris duro	125
Fundición gris blanda	80
Latón y bronce medianos	80
Aluminio y aleaciones dulces	50
Magnesio (Electrón)	31,5

Tabla 2.3: Presión específica de corte para el fresado (www.serina.es)

1. En todo caso, en cualquier trabajo de fresado deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:
2. Comenzar el trabajo con una velocidad de avance pequeña y aumentarla progresivamente, ya que la capa superficial es más dura que las interiores.
3. Procurar trabajar con velocidad de corte elevada y modificar el avance durante el trabajo, pues el avance afecta más a la máquina que la velocidad de corte, siempre, claro está, que no se llegue al límite de calentamiento admisible.
4. En los trabajos de desbastado se debe adoptar una velocidad de corte media. Para el acabado se debe reducir el avance y aumentar la velocidad de corte, para mejorar así la superficie.
5. Refrigerar con líquidos de corte la herramienta para conseguir un enfriamiento máximo.
6. Emplear sólo fresas de acero rápido en aquellos trabajos en que se tema un calentamiento excesivo de la herramienta.

2.1.3 Fuerzas de corte, momento torsor y potencia

Si designamos por K la fuerza específica de corte, la fuerza es:

$$F = K * S \quad [2.2]$$

Como la sección de la viruta es variable (figura 2.6), la fuerza máxima será la necesaria para cortar la sección máxima, que será:

$$S = AB * b = AC * \text{sen}(\alpha) * b \quad [2.3]$$

Siendo b la anchura de la viruta. AC es, en realidad, el avance por diente. Si Z es el número de dientes, n el número de r.p.m. y a el avance de corte en m/min, el avance por diente AC será:

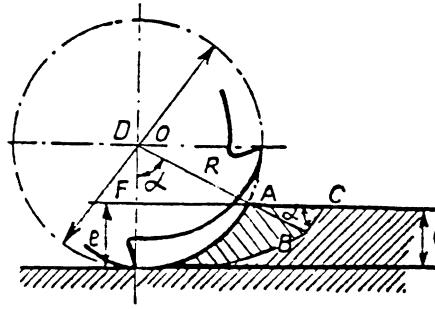


Figura 2.6: esquema de corte (www.serina.es)

$$AC = \frac{a}{Z * n} \quad [2.4]$$

y sustituyendo este valor en [2.3]

$$S = \frac{a}{Z * n} * \text{sen}(\alpha) * b \quad [2.5]$$

El valor de $\text{sen}(\alpha)$ se puede poner en función del diámetro de la fresa D y del espesor de la viruta cortada e de la manera siguiente. De la figura 2.6 se desprende que:

$$OA^2 = FA^2 + OF^2 = OA^2 * \text{sen}(\alpha) + OF^2 \quad [2.6]$$

o lo que es lo mismo:

$$R^2 = R^2 * \text{sen}^2(\alpha) + (R - e)^2 \quad [2.7]$$

$$\begin{aligned} \text{sen}(\alpha) &= \sqrt{\frac{R^2 - (R - e)^2}{R^2}} = \frac{\sqrt{R^2 - R^2 - e^2 + 2 * R * e}}{R} = \frac{\sqrt{2 * R * e - e^2}}{R} \\ &= \frac{\sqrt{2 * \frac{D}{2} * e - e^2}}{\frac{D}{2}} = \frac{2 * \sqrt{e * (D - e)}}{D} \quad [2.8] \end{aligned}$$

Sustituyendo este valor de $\text{sen}(\alpha)$ en la ecuación [2.5]:

$$S = \frac{a * b}{Z * n} * \frac{2 * \sqrt{e * (D - e)}}{D} = \frac{2 * a * b * \sqrt{e * (D - e)}}{Z * n * D} \quad [2.9]$$

y, por tanto, el valor de la fuerza de corte será:

$$F = K * \frac{2 * a * b * \sqrt{e * (D - e)}}{Z * n * D} \quad [2.10]$$

El momento torsor será:

$$M_t = F * R = F * \frac{D}{2} \quad [2.11]$$

La potencia absorbida será:

$$P = \frac{F * v}{\eta} \quad [2.11]$$

siendo η el rendimiento de la máquina.

Estas fórmulas son válidas tanto para el fresado en oposición como para el fresado en concordancia, variando sólo el rendimiento η que es inferior en el fresado en oposición, por el rozamiento de las fresas con la pieza.

2.1.4 Fresadoras según el número de ejes

Las máquinas fresadoras a parte de las manuales y las controladas por ordenador (CNC), se pueden separar según los grados de libertad que posean durante el arranque de viruta.

- **Fresadora de tres ejes:** Puede controlarse el movimiento relativo entre pieza y herramienta en los tres ejes de un sistema cartesiano.
- **Fresadora de cuatro ejes:** Además del movimiento relativo entre pieza y herramienta en tres ejes, se puede controlar el giro de la pieza sobre un eje, como con un mecanismo divisor o un plato giratorio. Se utilizan para generar superficies con un patrón cilíndrico, como engranajes o ejes estriados.
- **Fresadora de cinco ejes:** Además del movimiento relativo entre pieza y herramienta en tres ejes, se puede controlar o bien el giro de la pieza sobre dos ejes, uno perpendicular al eje de la herramienta y otro paralelo a ella (como con un mecanismo divisor y un plato giratorio en una fresadora vertical), o bien el giro de la pieza sobre un eje horizontal y la inclinación de la herramienta alrededor de un eje perpendicular al anterior. Se utilizan para generar formas complejas, como el rodete de una turbina Francis.



Figura 2.7: fresadora de 5 ejes (www.bhicorporation.com)

2.2 Termoconformado por vacío

El termoconformado es un proceso que consiste en dar forma a una lámina plástica por medio de calor (120 °C a 180 °C) y vacío (600 a 760 mmHg) utilizando un molde o matriz. Un exceso de temperatura puede "fundir" la lámina y la falta de calor o una mala calidad de vacío incurrirá en una pieza defectuosa y sin detalles definidos.

El termoconformado parte de una lámina rígida de espesor uniforme realizada por el proceso de extrusión y permite realizar pequeñas producciones por su bajo costo en matricería, llegando a ser rentable en altas producciones también.

Los materiales más utilizados son PAI, PP, PSI, PET, ABS, PEAD, PVC. También se puede termoconformar PVC espumado, policarbonato, acrílico, etc. Los espesores más comunes van de 0,2 mm (envases descartables) a 6 mm o más (carcasas para maquinaria).

Una restricción característica de este proceso es que la pieza a termoconformar debe ser fácilmente "desmoldable", esto significa que la matriz debe ser más ancha en la base y más angosta en la parte superior. Esto comúnmente se denomina ángulo de desmolde o de salida y generalmente es de 5 grados como mínimo.

2.2.1 Etapas

Aunque el proceso tiene numerosas variantes, cabe distinguir tres etapas fundamentales del proceso, que son:

- **Calentamiento del semielaborado:** ya sea por radiación, contacto o convección.
- **Moldeo del semielaborado:** tras calentarse se estira adaptándose al molde por medio de diferentes procesos (presión, vacío , presión y vacío o un contramolde).
- **Enfriamiento del producto:** comienza cuando el termoplástico entra en contacto con el molde y es enfriado por un ventilador o a temperatura ambiente y termina cuando la temperatura es la adecuada para desmoldear la pieza sin deformarla.

2.2.2 Parámetros

En esta técnica de transformación de plástico deben tenerse siempre en cuenta una serie de parámetros, que son:

- **Temperatura de conformado:** que depende sobre todo del material a transformar, aunque también de la complejidad y el espesor de la pieza.
- **Tiempo de calentamiento,** que depende sobre todo del espesor del material, aunque también del coeficiente de transmisión del mismo. Este es de gran importancia, y ha de ser suficiente para que la lámina alcance uniformemente en superficie y espesor la temperatura de conformado.
- **Tiempo de enfriamiento,** que depende de los mismos factores que el tiempo de calentamiento, y ha de ser suficiente para que el elaborado final sea resistente y no se deforme al desmoldear.
- **Presión o vacío,** depende sobre todo del espesor de la lámina aunque también de la complejidad de la pieza. Debe controlarse, ya que si es insuficiente no se obtendrán todos los detalles y si es excesiva se pueden producir agujeros o marcas.

2.2.3 Termoconformado al vacío directo

Es uno de los procesos más extendidos, debido a que es enormemente versátil y más económico que otros procesos por presión o mecánicos. Consiste en sujetar el semielaborado en una estructura y calentarlo hasta llegar al estado gomelástico para colocarlo sobre la cavidad del molde y que se adapte a su geometría. Se elimina el aire mediante presión conseguida por vacío (10 KPa), que empuja la lámina contra las paredes y contornos del molde. Una vez que ha enfriado, se extrae la pieza.

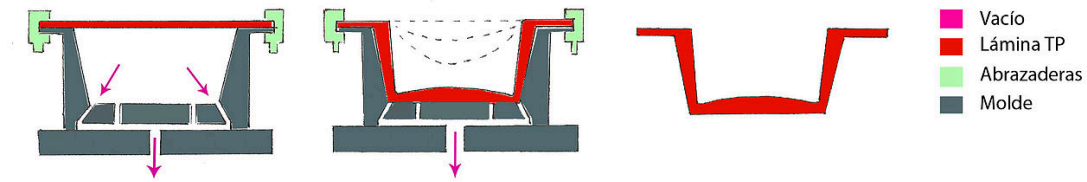


Figura 2.8: Proceso de termoconformado al vacío (www.wikipedia.org)

En general se puede afirmar que el costo del utillaje necesario para el termoconformado es bajo, debido a que las bajas presiones de trabajos permiten fabricar moldes muy económicos. Además, su puesta en servicio es rápida, al igual que el cambio de molde, lo que permite una gran flexibilidad del proceso, lo que hace que resulte muy económico para series pequeñas.

La mayor complejidad del molde se encuentra en los pequeños orificios de los que debe disponer para hacer vacío o presión y los sistemas de eliminación de calor, que sólo son incorporados si procede. En el caso de los orificios, siempre son preferibles y más eficaces las ranuras que los agujeros para permitir que se elimine el aire del interior del molde, y se deben fabricar con un diámetro inferior a 0,65 mm para evitar defectos en la superficie de la pieza acabada. Normalmente se sitúan en las zonas bajas o que no están conectadas al molde.

Hoy en día estamos rodeados de todo tipo de artículos termoconformados, aunque podemos dividirlos en dos grandes grupos:

1. La fabricación de piezas de gran superficie y estrechas paredes, como son bañeras, paneles interiores de electrodomésticos, paneles de puertas de coches o embarcaciones.
2. Todo tipo de envases de industria alimentaria, como son los recipientes de los yogures, hueveras, envases con diferentes cavidades para repostería, tarrinas individuales de mantequilla o mermelada, etc. Este tipo de envases con huecos también se puede aplicar a piezas de recambio o artículos de ferretería, portaherramientas o cubiteras.

Por otro lado, hay otros productos que se fabrican por este método como son las señales, accesorios de lámparas, cajones, vajillas, juguetes, cabinas transparentes de aviones o limpiaparabrisas de barcos.

2.3 Prototipado rápido (modelado por deposición de fundente)

El Prototipado Rápido, podemos concebirlo como un conjunto de tecnologías que permiten la obtención de prototipos, machos, moldes de inyección para plásticos, etc., en menos de 24 horas a partir de un fichero CAD. Consecuencia de esta rapidez de respuesta, es que el tiempo de desarrollo de un producto puede reducirse a la mitad, la quinta e incluso la décima parte.

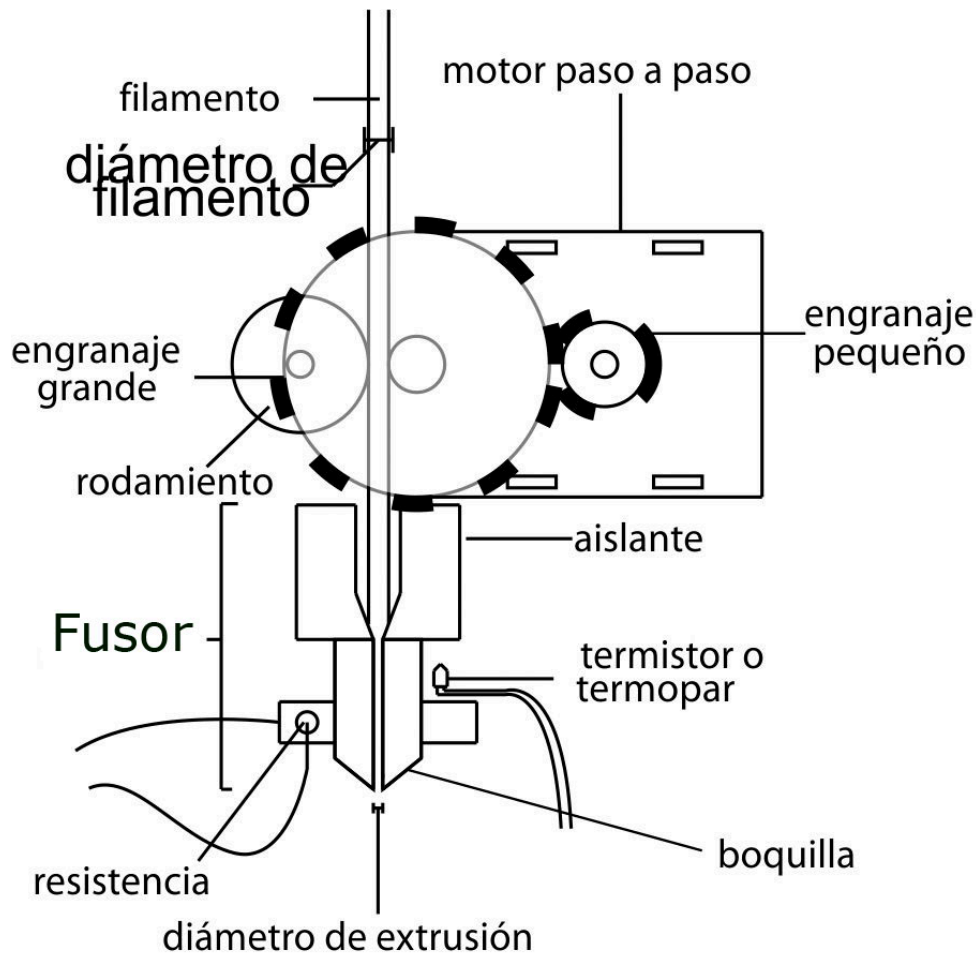
El prototipado rápido (RP por sus siglas en inglés, Rapid Prototipe) da la posibilidad de efectuar en un tiempo relativamente corto, diversas pruebas de geometrías distintas para una pieza, validar la geometría definitiva, y acometer la producción en serie rápidamente, con unos costes de desarrollo lo más ajustados posibles. La complejidad de las piezas o la confidencialidad de los prototipos son también argumentos frecuentes a la hora de optar por el RP. Dentro de la denominación de "prototipado rápido" no se suele incluir al Mecanizado de Alta Velocidad (MAV) que, sin embargo, es una tecnología sustractiva para mecanizar piezas o moldes a altas velocidades de arranque de viruta.

Bajo el nombre de prototipado rápido se agrupan a una serie de distintas tecnologías de construcción de sólidos. Todas ellas parten del corte en secciones horizontales paralelas de piezas representadas en CAD. Estas secciones caracterizan a todas las tecnologías de prototipado rápido, que construyen las formas sólidas a partir de la superposición de capas horizontales. Las tecnologías más difundidas son en la actualidad:

SLA (Estereolitografía): Emplea un láser UV que se proyecta sobre un baño de resina fotosensible líquida para polimerizarla.

SGC (Fotopolimerización por luz UV): Al igual que en la estereolitografía, esta tecnología se basa en la solidificación de un fotopolímero o resina fotosensible. En la fotopolimerización, sin embargo, se irradia con una lámpara de UV de gran potencia todos los puntos de la sección simultáneamente.

FDM (Deposición de hilo fundido): El modelado por deposición fundida utiliza una técnica aditiva, depositando el material en capas, para conformar la pieza. Un filamento plástico o metálico que inicialmente se almacena en rollos, es introducido en una boquilla. La boquilla se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material y puede desplazarse en tres ejes controlada electrónicamente. La boquilla normalmente la mueven motores a pasos o servomotores. La pieza es construida con finos hilos del material que solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla.



*Figura 2.9: esquema de funcionamiento de una máquina FDM
(www.fabricame.com)*

Esta tecnología fue desarrollada por S. Scott Crump a finales de los 1980s, y fue comercializada en 1990. El término en inglés, Fused Deposition Modeling, y sus siglas, FDM, son una marca registrada de Stratasys Inc. El término equivalente, fused filament fabrication (fabricación con filamento fundido) y sus siglas FFF, fueron acuñados por la comunidad de miembros del proyecto RepRap para disponer de una terminología que pudieran utilizar legalmente sin limitaciones.

SLS (Sinterización selectiva láser): Se deposita una capa de polvo, de unas décimas de mm., en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un láser CO2 sinteriza el polvo en los puntos seleccionados.

LOM (Fabricación por corte y laminado): Una hoja de papel encolado se posiciona automáticamente sobre una plataforma y se prensa con un rodillo caliente que la adhiere a la hoja precedente.

DSPC (Proyección aglutinante): Esta tecnología trabaja mediante la deposición de material en polvo en capas y la ligazón selectiva del mismo mediante la impresión de "chorro de tinta" de un material aglutinante.

En general se reserva la fabricación de precisión a la estereolitografía y cuando valora más las prestaciones mecánicas del modelo (prototipos funcionales), se prefiere el sinterizado, que ofrece más variedad de materiales: resinas fotosensibles, materiales termofusibles, metales, cerámica, papel plastificado.

	SLA	SGC	SLS	LOM	FDM
Tecnología	Polimerización	Polimerización	Sinterización	Corte, Laminado	Deposición de hilo
Láser	Sí	No	Sí	Sí	No
Materiales	Fotopolímeros	Fotopolímeros	PVC, policarbonatos, nylon y ceras	Papel, poliéster y nylon-celulosa	Ceras, ABS, PLA y plástico tipo nylon
Ventajas	Tecnología más madura, más rápida y precisión del 2%	Mayor precisión, mejores propiedades mecánicas y no hacen falta soportes	Material más barato, mayor variedad de materiales y no hacen falta soportes	Precisión hasta el 0,1%, de 5 a 10 veces más rápido que otros medios y material más barato	Material más barato, no hacen falta soportes y más rápido que el SLA
Desventajas	Los modelos son translúcidos, quebradizos y algunas partes requieren soportes	Es el equipo más caro, tiene un gran tamaño y una gran complejidad.	Tolerancia del 5 % y las piezas suelen tener un aspecto laminado	Deformación en las láminas	Aspecto laminado

Tabla 2.4: Características de los distintos métodos de prototipado rápido (José Antonio Alonso Rodríguez, 2006)

Los conceptos de resolución y tolerancia de impresión aparecen a menudo mezclados, superpuestos e incluso intercambiados. Algunos fabricantes prefieren usar un término que englobe a ambos conceptos, tal como precisión dimensional.

Parece más razonable referir la resolución de una impresora 3D a la capacidad de posicionamiento o de discernimiento de distancias antes de la inyección o depósito de material, mientras que la tolerancia de impresión dependerá, además, del proceso de solidificación o de acabado. Una buena prueba de que pueden ser tomados como conceptos diferentes es que a menudo la tolerancia de impresión suele presentar valores más desfavorables que la resolución.

En cualquier caso, la resolución puede estar dada en espesor de capa, mientras que en el plano X-Y, puede estarlo por puntos por pulgada (ppp). El espesor típico de capa es del orden de 100 micras (0,1 mm), aunque algunas máquinas tales como el Objet Connex imprimen capas tan delgadas como 16 micras. La resolución X-Y es comparable a la de las impresoras láser convencionales. En el caso de que el proceso las use, las partículas son del orden de 50 a 100 micras (0,05-0,1 mm) de diámetro.

La tolerancia final de pieza dependerá profundamente, además de la resolución antes descrita, de la tecnología y del material utilizados. Es uno de los parámetros más importantes en la elección de proceso de impresión y del dispositivo, ya que no sólo determinará la propia tolerancia dimensional de la pieza, sino si, en caso de espesores pequeños, dicha pieza es realizable o no.

El límite actual de tolerancia para dispositivos DIY o de bajo coste están en torno a 0,1 - 0,2 mm. Para trabajos de más demanda dimensional, algunos fabricantes son capaces de garantizar tolerancias del orden de las decenas de micras

2.3.1 Aplicaciones

Generalidades

Aplicaciones típicas incluyen visualización de diseños, prototipado/CAD, arquitectura, educación, salud y entretenimiento. Otras aplicaciones pueden llegar a incluir reconstrucción de fósiles en paleontología, replicado de antigüedades o piezas de especial valor en arqueología y reconstrucción de huesos y partes del cuerpo en ciencia forense.

Biotecnología

La tecnología de impresión 3D está siendo actualmente estudiada en el ámbito de la biotecnología, tanto académico como comercial, para su posible uso en la ingeniería de tejidos, donde órganos y partes del cuerpo son construidas usando técnicas similares a la inyección de tinta en impresión convencional. Capas de células vivas son depositadas sobre un medio de gel y superpuestas una sobre otra para formar estructuras tridimensionales. Algunos términos han sido usados para denominar a este campo de investigación, tales como impresión de órganos, bio-impresión e ingeniería de tejidos asistida por computadora, entre otros.

Arqueología

El uso de tecnologías de escaneo 3D, permite la réplica de objetos reales sin el uso de procesos de moldeo, que en muchos casos pueden ser más caros, más difíciles y demasiado invasivos para ser llevados a cabo; en particular, con reliquias de alto valor cultural donde el contacto directo con sustancias de moldeo puede dañar la superficie del objeto original.

2.3.2 Uso doméstico

Han existido diferentes esfuerzos, a veces relacionados entre sí, para desarrollar impresoras 3D adecuadas para su uso de "sobremesa" y conseguir que esta tecnología esté disponible a precios asumibles para el público. Gran cantidad de estos trabajos han sido dirigidos y enfocados hacia los entusiastas del DIY o las comunidades de 'early adopter'.

RepRap

RepRap es un proyecto que intenta desarrollar una impresora 3D de código abierto gratuito FOSS, cuyas especificaciones completas son distribuidas bajo la Licencia General Pública GNU; esta impresora puede copiar algunas partes de sí misma. La RepRap puede únicamente imprimir sus partes plásticas. Se está llevando a cabo un desarrollo para dotar al dispositivo de la capacidad de imprimir sus propias placas de circuitos también, así como sus piezas de metal.

El creador visiona la posibilidad de distribuir a bajo costo máquinas RepRap a personas y comunidades, permitiéndoles crear (o descargar de Internet) productos y objetos complejos sin la necesidad de maquinaria industrial costosa. Dando apertura al diseño de productos y oportunidades de manufactura a cualquier persona, esto debería en gran medida reducir el ciclo de trabajo para las mejoras a productos y soporte de una mayor diversidad de nichos de productos, mayor que la capacidad actual de producción de las fabricas.

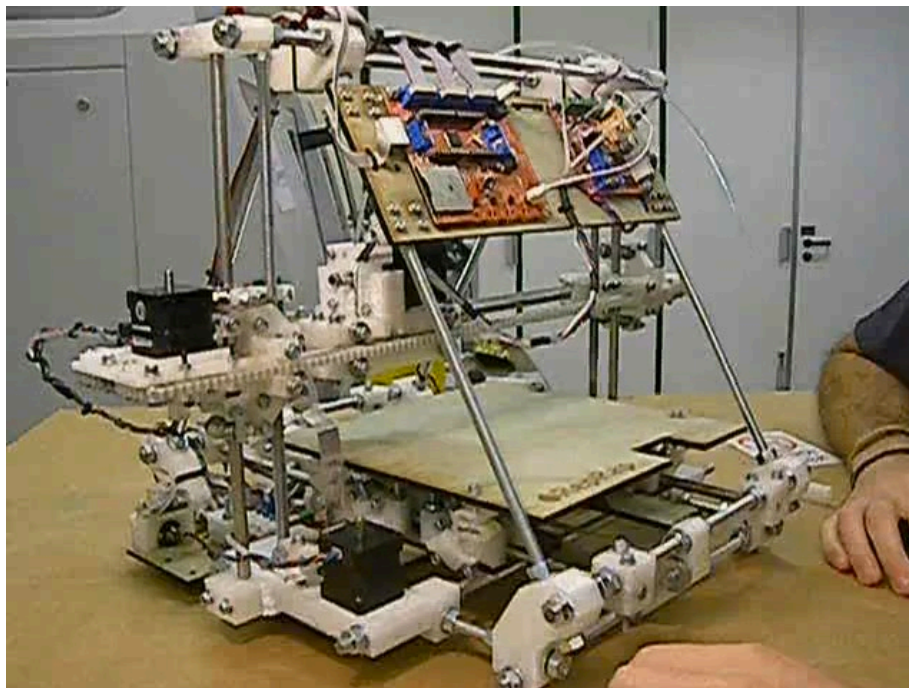


Figura 2.10: RepRap versión 2.0, Mendel (www.wikipedia.org)

3 Aerodinámica en motocicletas

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.

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.

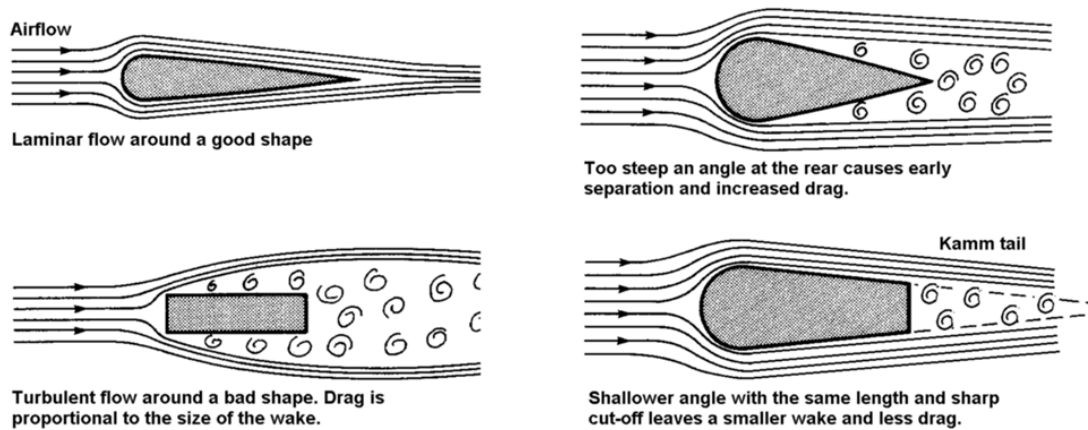


Figura 3.1: Estelas (Tony Foale)

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 C_d . A menudo se deduce incorrectamente que si empujamos una chapa plana a través del aire, su C_d 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 C_d por el área frontal, esto se conoce como C_dA y sus unidades son las que se hayan utilizado para medir el área. El valor de C_d como parámetro adimensional y el de C_dA es:

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

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.

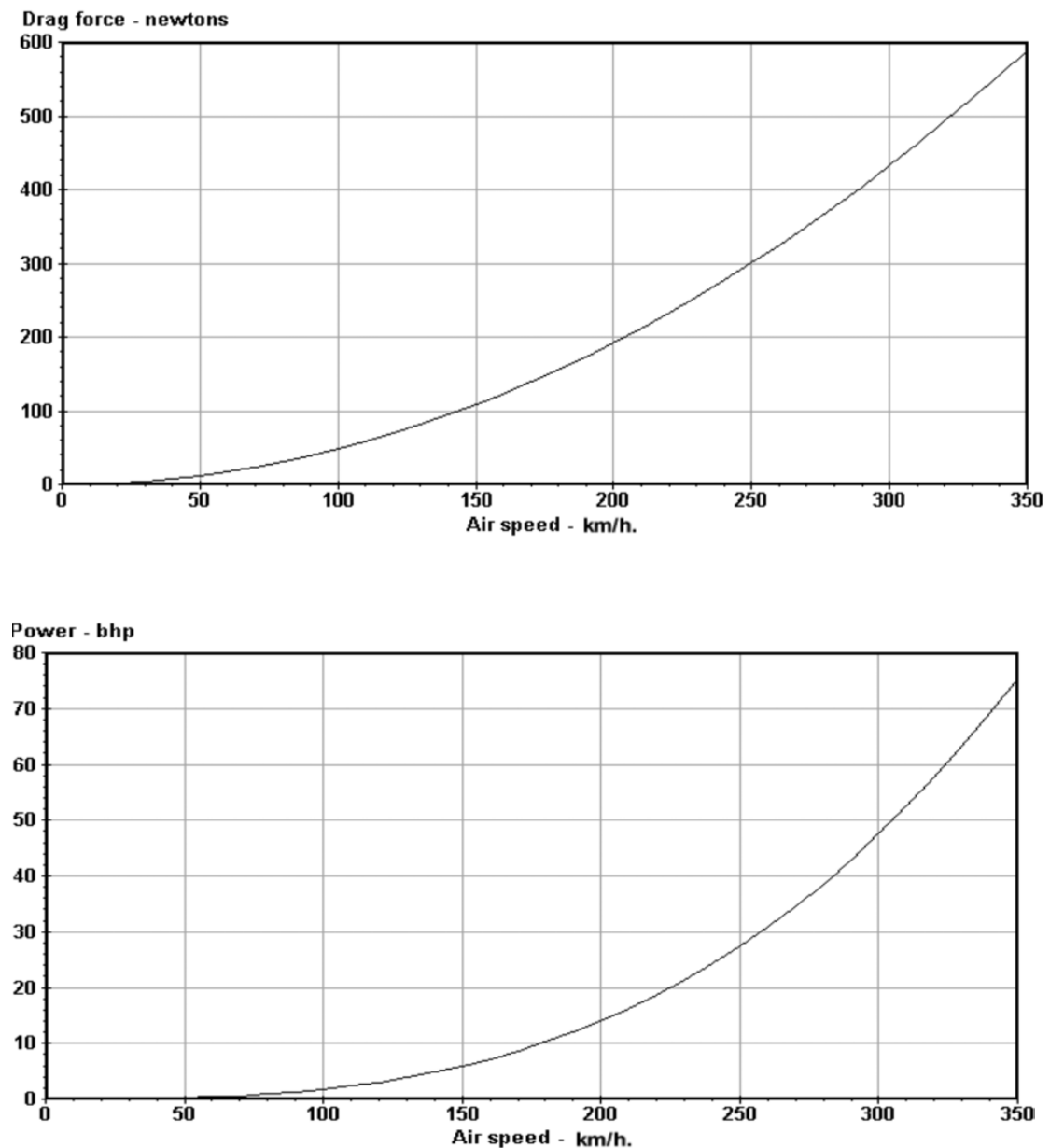


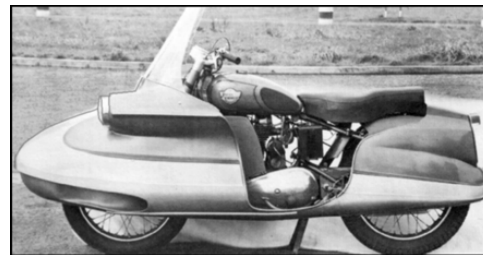
Figura 3.2: Evolución del drag y la potencia con la velocidad (Tony Foale)

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 $CD = 1$. 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 $CD = 1$.

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)

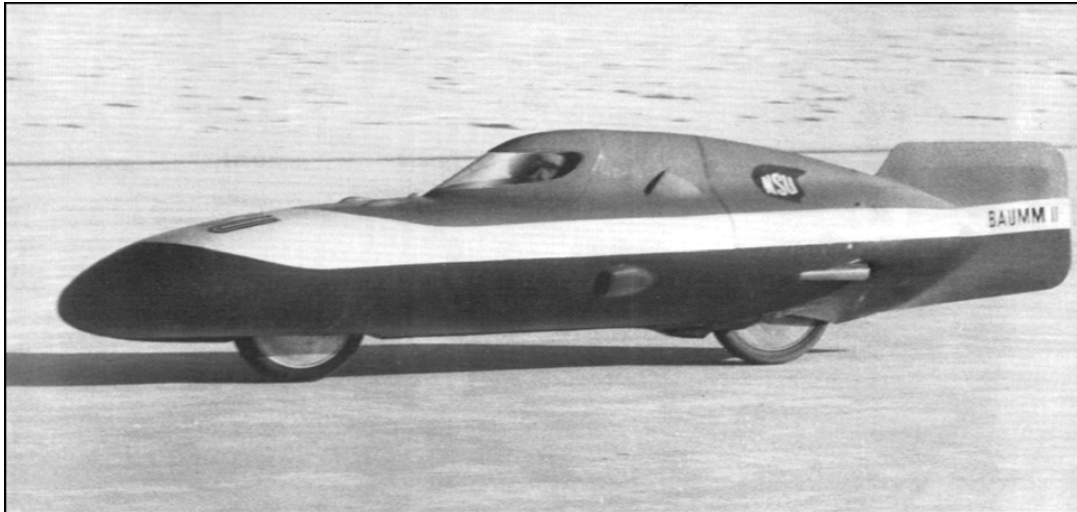
Tratar de conseguir estos resultados mediante una mejora aerodinámica tiene sus problemas, fundamentalmente porque todas las pruebas se llevaron a cabo sin modificar las relaciones de la caja de cambios, por lo que las rpm que alcanzaba el motor y por tanto la potencia que producía eran diferentes durante 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.

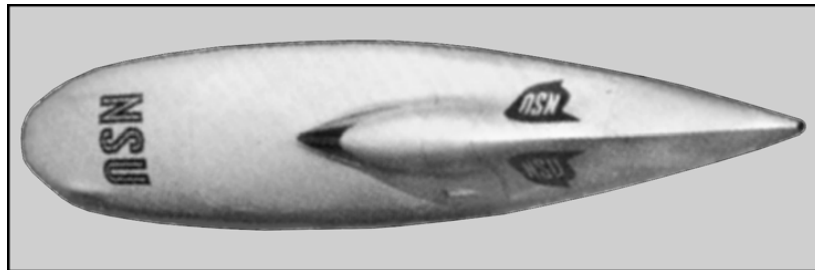


Figura 3.4: NSU "flying hammock" (Tony Foale)

3.2 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.

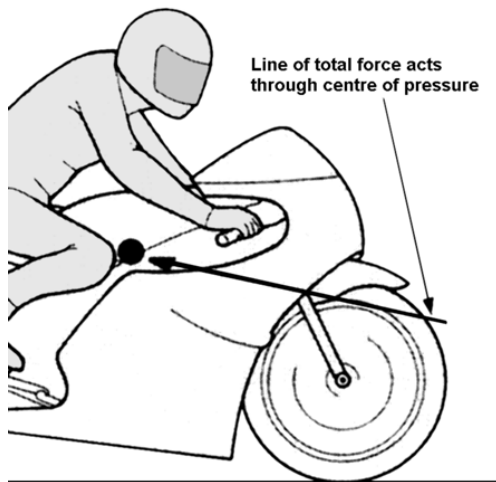


Fig 5.6 In the case shown, the resultant aerodynamic force is acting upward. The horizontal component is the drag force and the vertical component represents a lift force.

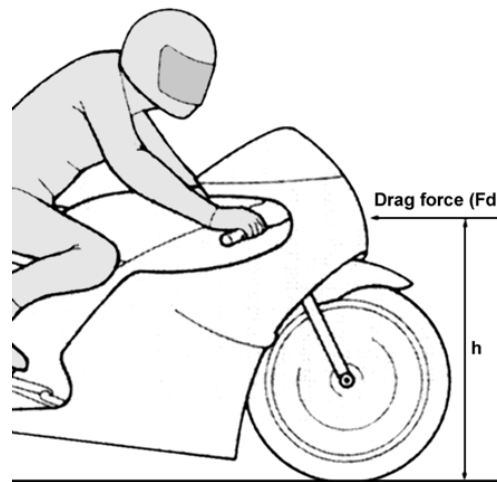


Fig 5.7 The drag force F_d acts at height h to create a moment $F_d \cdot h$ tending to unload the front wheel and load the rear.

Figura 3.5: 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.

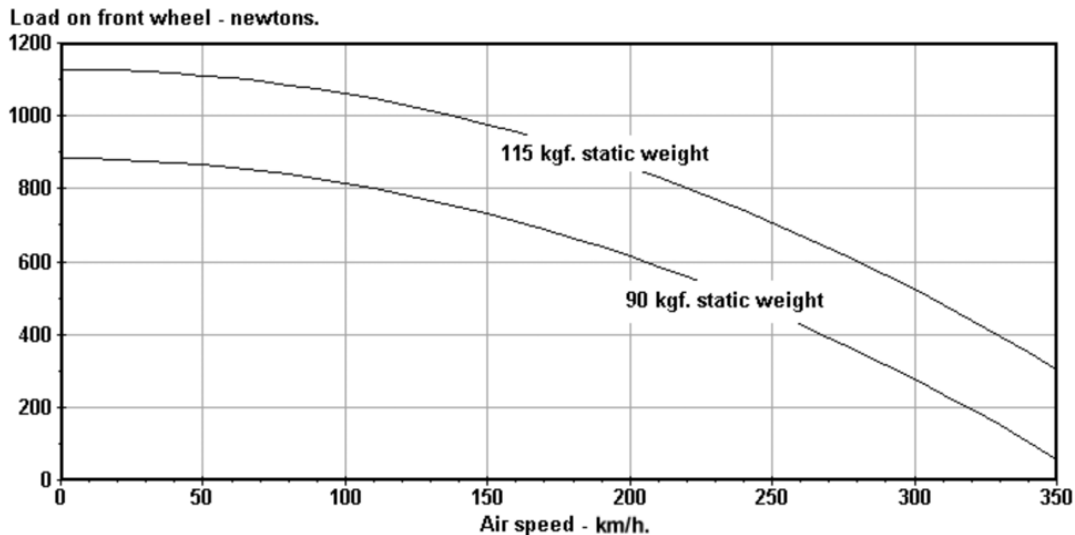
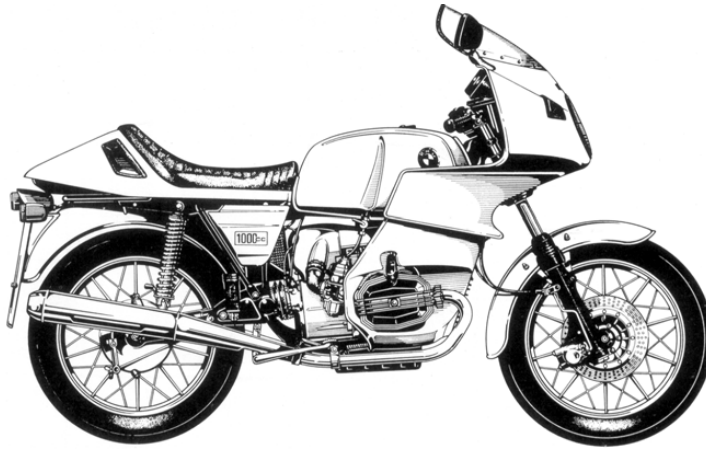


Figura 3.6: Variación de la carga en la rueda frontal al variar la velocidad del aire (Tony Foale)

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 considerable para reducir la pérdida de carga en la rueda delantera debida 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.

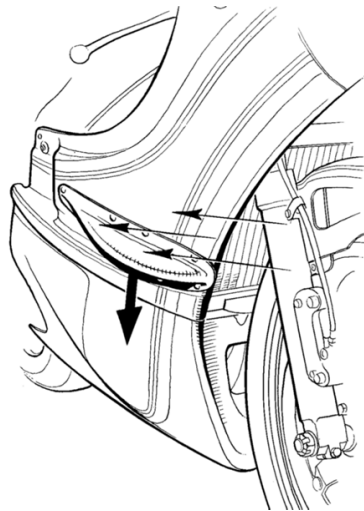


Figura 3.7: Carenados con sustentación negativa (Tony Foale)

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.

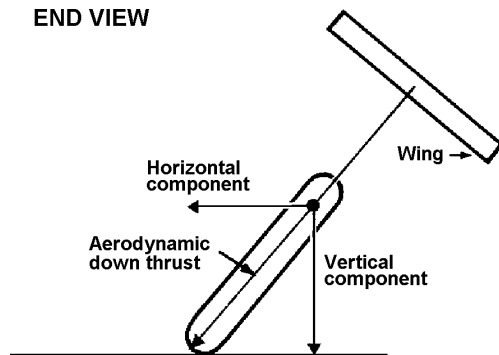


Fig 5.10 A fixed wing across the bike just increases the horizontal and vertical components acting on the tyres in the same proportion and hence there is no nett gain in cornering performance. Probably the reverse.

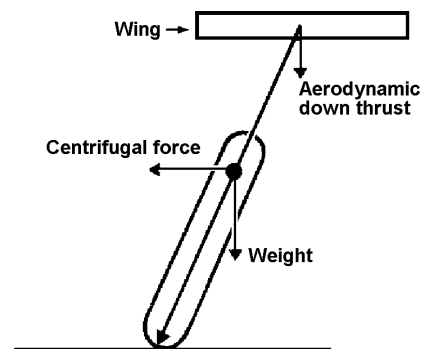


Fig 5.11 In theory, a tilting wing that remained horizontal could enhance braking, traction and cornering power. As a side effect, a smaller angle of lean would be required for a given cornering speed.

Figura 3.8: 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.

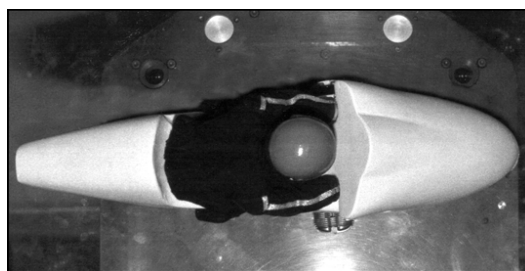
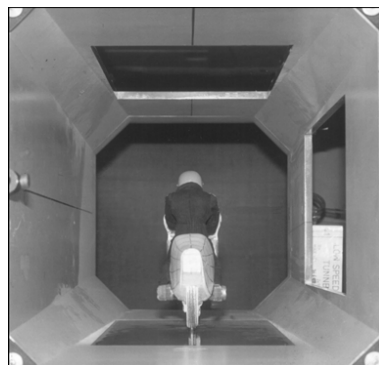
Other disadvantages would include: greater roll moments due to side winds and even with a light-weight wing structure its high position would increase the roll moment of inertia quite considerably, any lateral flexibility in the mountings would most likely result in some form of weave instability.

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 3.9: 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 3.10: 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 3.11: NSU bate records en el túnel de viento del Colegio Técnico de Stuttgart (Tony Foale)

4 Fabricación

Primero de todo, nos centraremos en la fabricación del modelo a escala, que posteriormente analizaremos en el túnel de viento. Nos basaremos en la motocicleta que diseñó la Universidad de Jaén para el proyecto motostudent de 2012. Se trata de una motocicleta de 250 cc de competición con un chasis de acero de doble cuna y un motor Yamaha con carburación.

Se procederá a utilizar distintos métodos de fabricación, con el objetivo de alcanzar una idea realista de los fundamentos y dificultades técnicas que presentan los distintos procesos de manufactura. En este sentido, entre las diferentes técnicas, se optará por fabricar los distintos componentes de la maqueta mediante el uso de mecanizado, termoconformado e impresión 3D. El plan de fabricación a seguir será:

- 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.

4.1 Diseño para fabricación de la geometría (CAD)

Para poder crear el modelo, vamos a hacer un diseño en 3D de la motocicleta a escala real. En el diseño del modelo a escala, habrá que considerar las limitaciones impuestas por las distintas técnicas de fabricación. En este sentido, se detallará el proceso de diseño “para fabricación” del modelo, justificando razonadamente las modificaciones realizadas sobre la motocicleta original de cara a la fabricación. Las dimensiones de la motocicleta a escala se han definido en base a las limitaciones de bloqueo aerodinámico del área transversal del túnel de viento que determina un área del cuerpo inferior al 10% de la sección transversal del túnel, que es de 400x400 mm.



Figura 4.1: Lateral de la moto a modelar



Figura 4.2: Parte delantera y trasera de la moto a modelar

Empezaremos por la parte frontal del carenado (quilla, laterales y cúpula), esta parte es de gran importancia para el modelo, ya que será la primera en encontrar el flujo de aire en el túnel, y en las motocicletas es la parte más importante desde el punto de vista aerodinámico. Por eso, para conseguir un buen acabado superficial y precisión, se hará mediante termoconformado.

Mediante el software SolidWorks, usamos las imágenes de la motocicleta a escala real, las colocamos en los planos correspondientes y las escalamos hasta que las medidas del programa y de la motocicleta real coincidan.

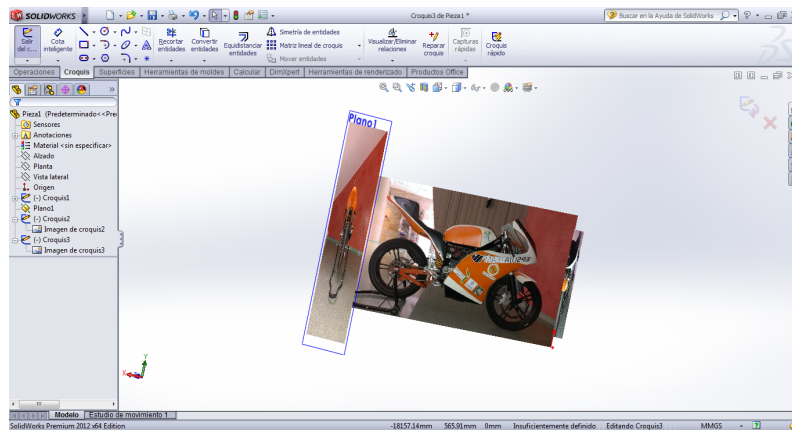


Figura 4.3: Entorno de SolidWorks con las distintas vistas de la moto

Una vez tenemos bien definido el entorno 3D y utilizando algunas medidas tomadas sobre la motocicleta real, vamos colocando puntos de la superficie a modelar, dándoles su posición en las tres dimensiones del espacio y uniéndolos hasta que obtenemos la superficie deseada, a la que le damos 2 mm de espesor para obtener la geometría CAD de esta parte del carenado.

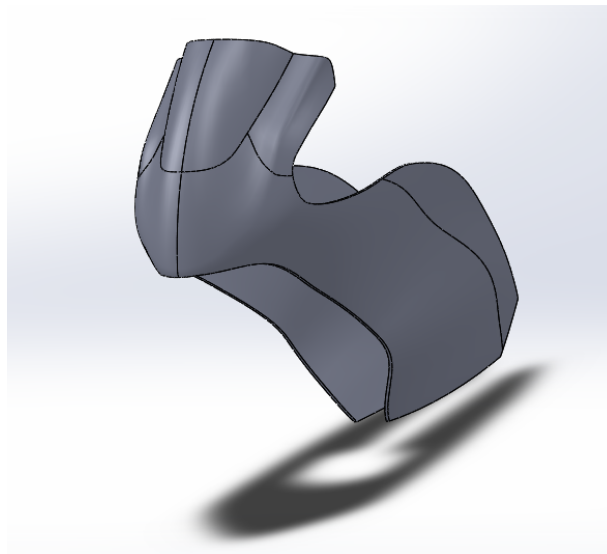


Figura 4.4: Geometría del carenado frontal sin la quilla

4.2 Diseño CAD de los moldes

Para poder termoconformar el carenado de la parte frontal, dividiremos la geometría de la pieza en dos partes simétricas y haremos un molde de cada una, que posteriormente uniremos para obtener la pieza definitiva.

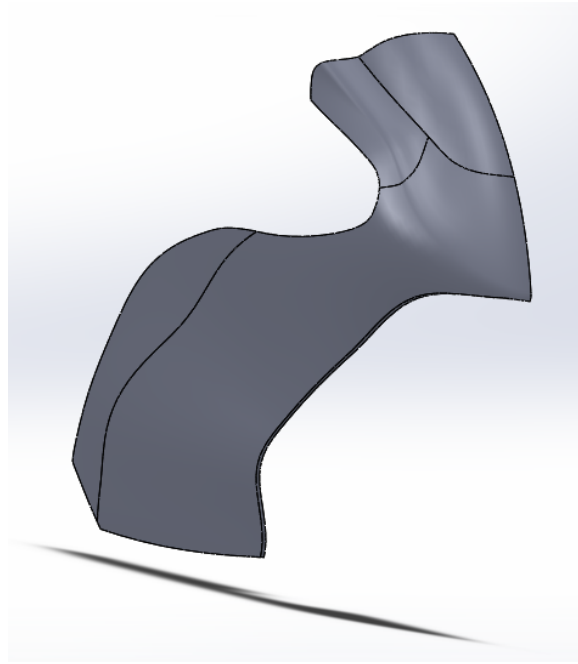


Figura 4.5: Pieza lateral del carenado que se utilizará para el molde

Esta es la pieza que deseamos obtener mediante el termoconformado, para ello crearemos los moldes a partir de una extrusión de la superficie hasta la que será la base del molde. A la extrusión anterior se le han sumado 4 mm de seguridad entre la figura y la base, para evitar cualquier desperfecto en el proceso de amoldamiento del plástico o en el posterior corte de la pieza.

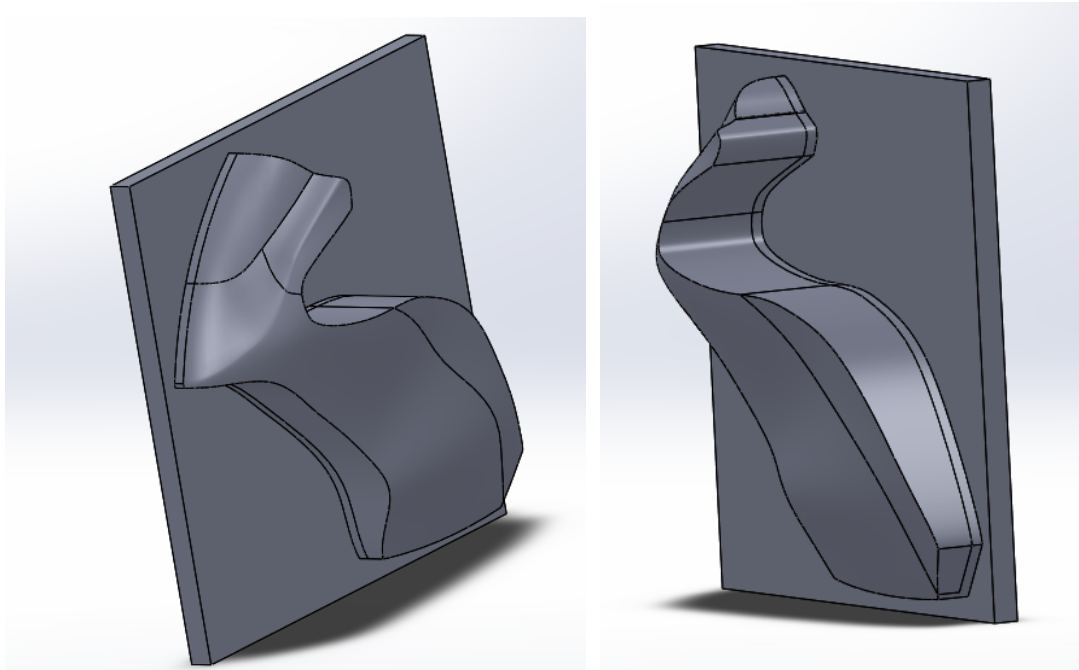


Figura 4.6: Geometría del molde para termoconformar

Una vez tenemos el molde a tamaño real del carenado de la motocicleta, lo escalamos para obtener el carenado del modelo a escala que utilizaremos en el túnel de viento. Utilizaremos una escala de 1:5,5 para adaptarnos lo máximo posible a las medidas del túnel y de la fresadora que utilizaremos para mecanizar los moldes. Las medidas de los moldes se pueden ver en el anexo 7.1.

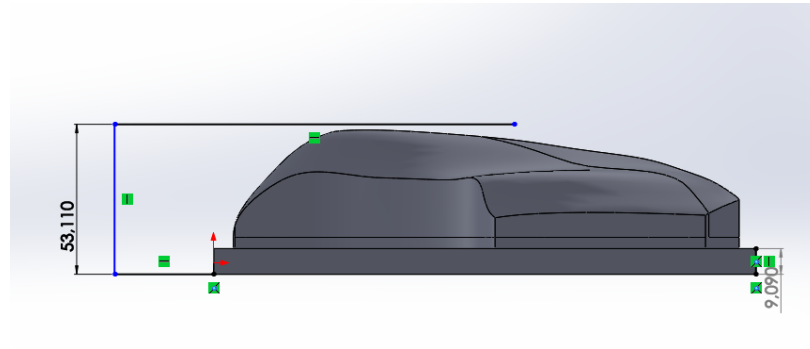


Figura 4.7: Vista lateral del molde

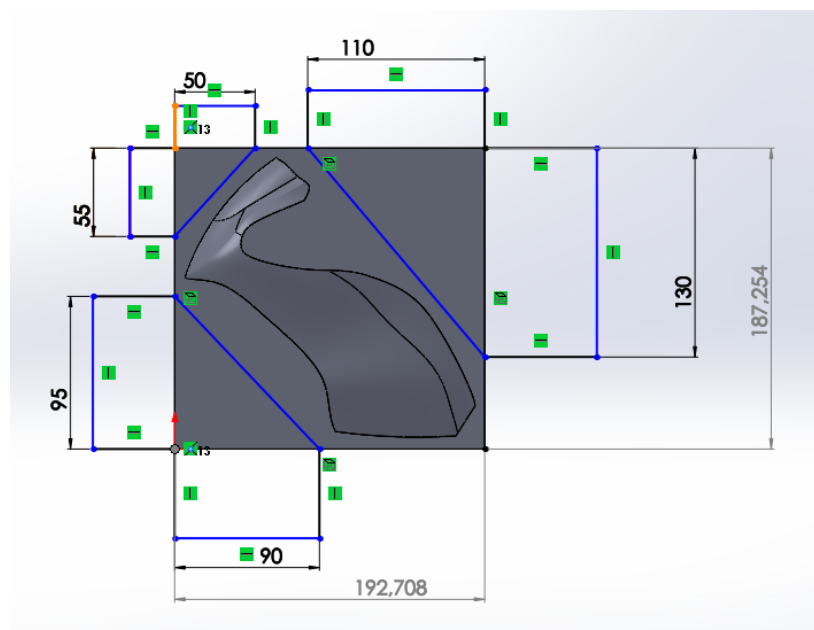


Figura 4.8: Alzado del molde

4.3 Diseño del proceso de mecanizado

Los moldes se fabricarán mediante el mecanizado de un tocho macizo de madera. La elección del material del molde se debe fundamentalmente a que es un material fácilmente mecanizable, por lo que permite trabajar a elevadas velocidades de corte sin refrigeración, y por otro lado, al ser un material blando acepta velocidades altas de avance, que reducen la duración del mecanizado total. Para este proceso utilizaremos una fresadora CNC de tres ejes, compatible con el código G (o ISO) para el lenguaje de control Fagor

8055. Contamos con una fresadora docente Odisea, de Alecop, con las siguientes características técnicas:



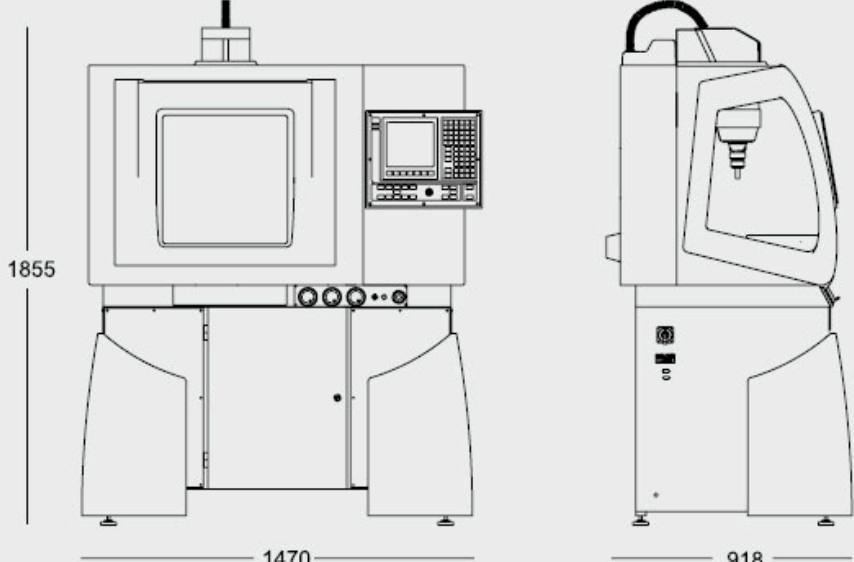
	
Recorrido en el eje longitudinal X	200 mm
Recorrido en el eje transversal Y	200 mm
Recorrido en el eje vertical Z	200 mm
Dimensiones de la mesa de trabajo	450x180 mm
Distancia máxima cabezal/ mesa	320 mm
Conicidad del husillo	ISO 30
Motor del cabezal	Asíncrono trifásico de 1,5 kW
Velocidad de giro del cabezal	de 100 a 4000 rpm
Cono del cabezal	ISO 30
Motores de accionamiento de ejes	CC (1.44 Nm)
Avance rápido	5000 mm/min
Resolución electrónica	0,001 mm
Apertura de puerta	Automática
Tensión de alimentación monofásica	230V 50/60Hz
Dimensiones	1470x 918x 1855 mm
Peso aproximado	550 Kg

Tabla 4.1: Características técnicas, fresadora CNC Odisea de Alecop (www.alecop.com)

El plan de fabricación a seguir para el diseño del proceso de mecanizado será el siguiente:

- Definición del tocho y del plano de seguridad en CATIA.
- Programación de una operación de desbastado.
- Programación de dos operaciones finales de acabado.
- Obtención del código ISO que se utilizará en la máquina.

Dada la complejidad geométrica de la pieza a fabricar, el mecanizado sólo puede ser programado mediante el uso de un software CAM. Por tanto, tras definir el plan de mecanizado, se procederá a ejecutar el mismo de forma virtual mediante CATIA V5 R21, estableciendo los distintos parámetros de mecanizado para el cálculo final de la trayectoria, y la obtención del código ISO que será introducido en la máquina de CNC. El código ISO del mecanizado, define las trayectorias (mediante G00, G01, G02 y G03), parámetros de corte y avance (F y S), cambios de herramientas (T), activación de refrigeración (M08), compensación de la herramienta (G43) ...

Hay que decir que las medidas del molde se han definido ajustándose lo máximo posible a las limitaciones de trabajo de la máquina. Aunque el volumen de trabajo de la máquina es de 200x200x200 mm, hay que dejar espacio lateral para que la herramienta rodé la figura y pueda entrar o salir lateralmente mientras corta, como hará en la mayoría de las operaciones. Por eso se ha definido un molde con una base de 192,708x187,254 mm.

Lo primero de todo será exportar la geometría creada en SolidWorks, como un sólido, en un formato que pueda leer CATIA, nosotros hemos elegido el .step (Standard for the Exchange of Product Data), aunque también hay otros que podrían ser válidos. Cuando abramos la geometría con CATIA, nos aseguramos de colocar el origen de coordenadas de CATIA con el que queramos utilizar para la fresadora.

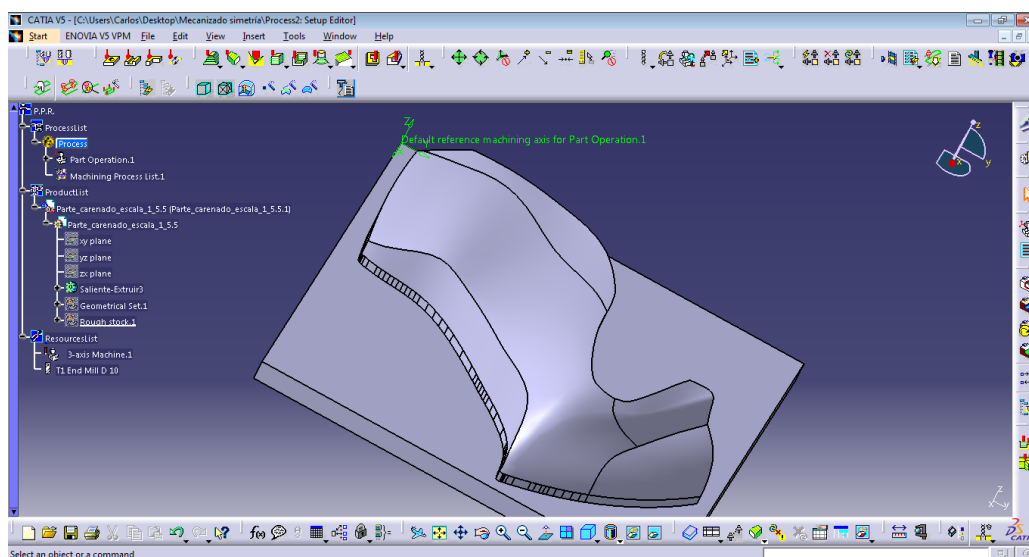


Figura 4.9: Geometría del molde importada en formato .step a CATIA

Como se ve en la imagen anterior, hemos elegido la esquina inferior izquierda de la parte superior de la base como origen de coordenadas. El siguiente paso es crear el tocho, al que le daremos las medidas del bloque de madera que hemos elegido, el cual ha sido cortado con las medidas de la base en los ejes x e y, pero al que se le han dejado 56 mm en el eje z, haciendo así que la superficie superior del mecanizado no coincida con la del tocho, evitando cualquier desperfecto que hubiese en la superficie de éste y que echase a perder la pieza final. También creamos un plano de seguridad, un poco por encima del tocho (en nuestro caso a 58 mm), este plano sirve para definir el límite de proximidad a la pieza de los movimientos rápidos de aproximación de la herramienta, para asegurar que ésta no choque con la pieza durante el proceso de mecanizado.

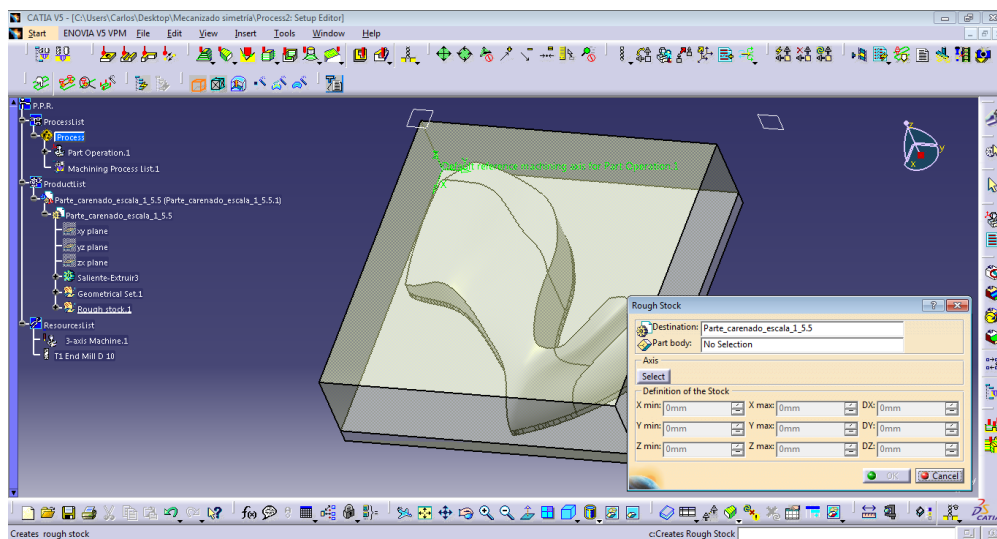


Figura 4.10: Definición de las medidas del tocho

Una vez hecho esto, nos vamos al módulo de mecanizado de CATIA y en el árbol de la izquierda hacemos doble clic sobre la opción “Part Operation”. Seleccionamos la máquina, el origen de coordenadas y rellenamos todos los campos que se nos piden.

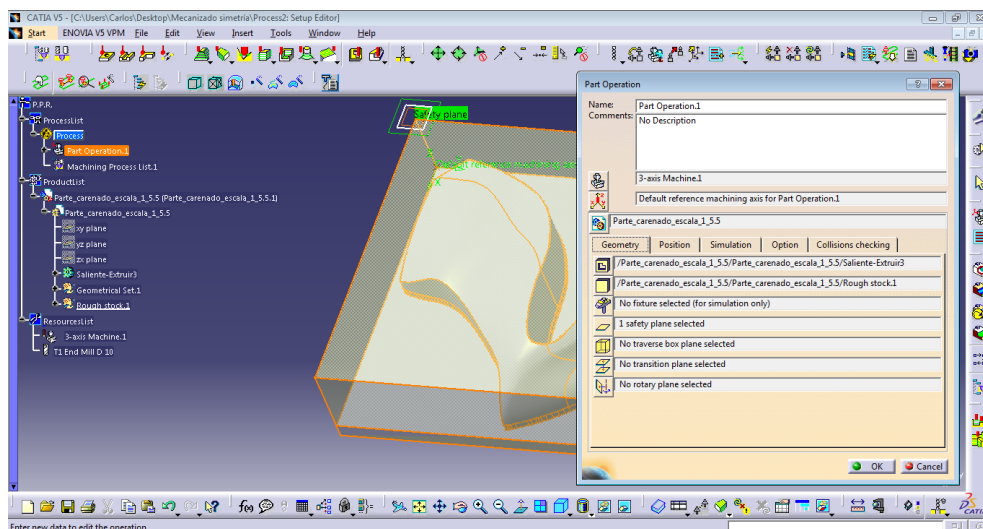


Figura 4.11: Definición de la máquina, del plano de seguridad y del tocho

Ahora hacemos clic en “Manufacturing Program” (dentro del árbol) y seleccionamos unas de las opciones de mecanizado que nos ofrece CATIA. Nosotros optamos por un desbastado inicial y dos barridos en direcciones perpendiculares, para conseguir un acabado lo más fino posible.

Para las tres operaciones de desbaste y acabado del tocho, se usará la misma herramienta, una fresa de forma semiesférica de 10 mm de diámetro.

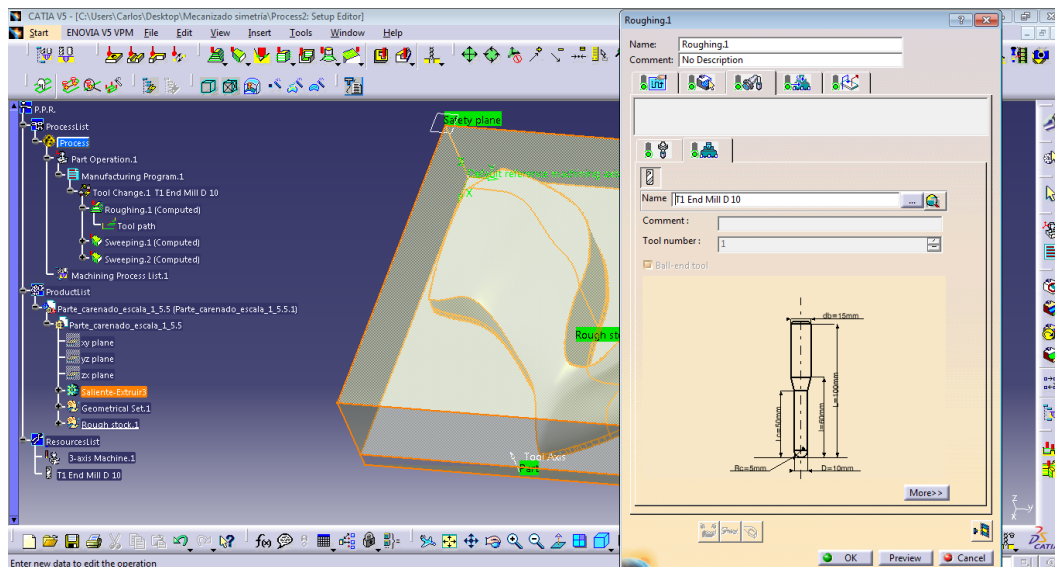


Figura 4.12: Definición de la herramienta a utilizar

Después de elegir la herramienta, se vuelve a definir el tocho, el plano de seguridad y la geometría que se quiere mecanizar en el tocho. Estas tres opciones son las más importantes, pero cuantos más campos se rellenen, más específica será la simulación y el posterior código.

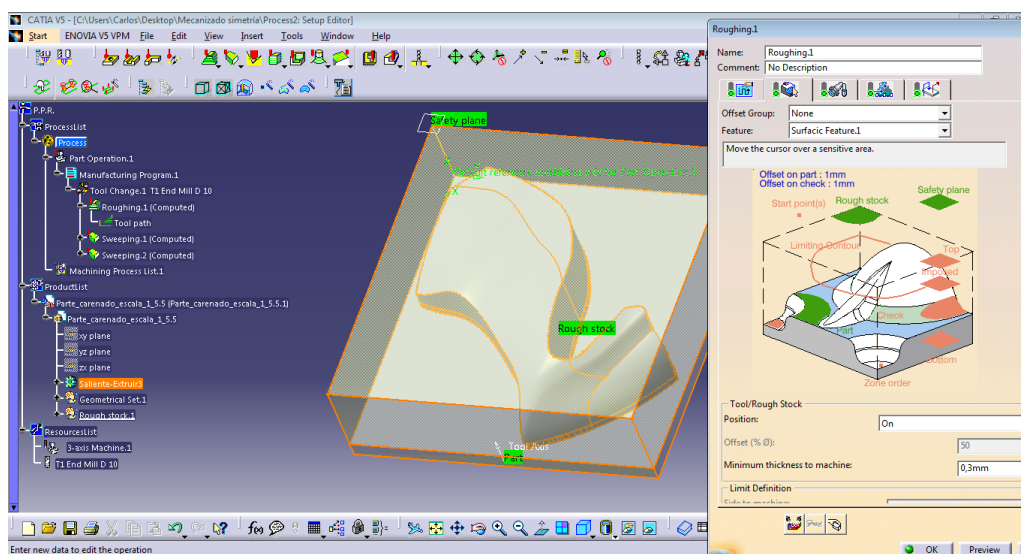


Figura 4.13: Definición de los distintos elementos de la simulación

También se puede indicar la forma que quieres que siga la herramienta al mecanizar, esto puede ahorrar mucho tiempo dependiendo de la geometría de la pieza, por ejemplo, en nuestro caso se usó un avance en espiral de fuera a dentro en el desbastado, porque daba unos tiempos menores que en zigzag. También se pueden variar distintos parámetros relacionados con la tolerancia de la herramienta.

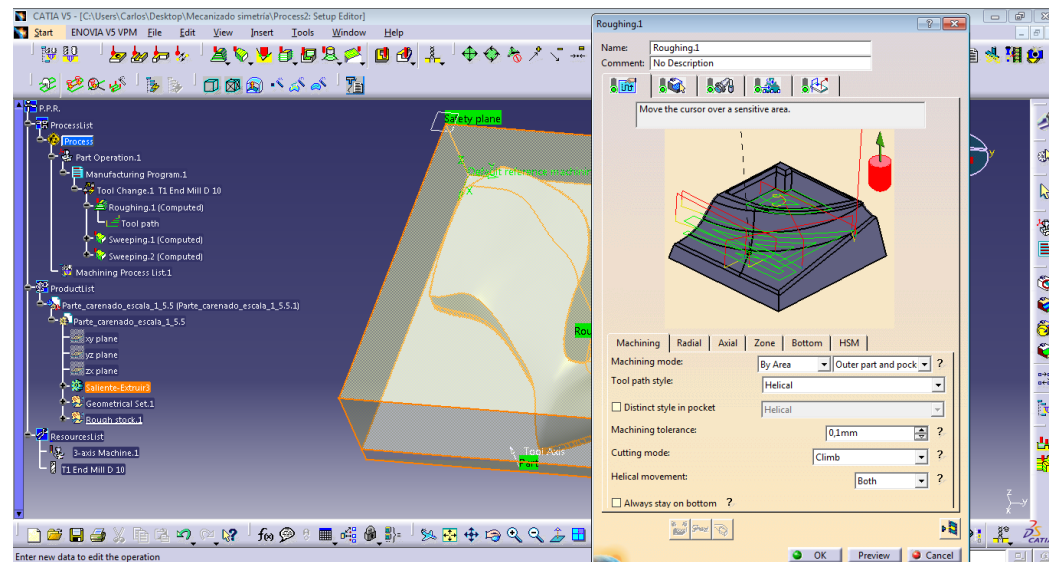


Figura 4.14: Selección del tipo de trayectoria de la fresa

Por último, se modifica el giro y la velocidad de avance de la pieza en los distintos movimientos, para madera y un solapamiento de la herramienta igual al radio.

Operación	Máquina	Herramienta	Velocidad de corte(mm/min)	Velocidad de avance(mm/min)
Desbastado	Fresadora CNC	Fresa esférica con d = 10 mm	2500	200
Barrido 1	Fresadora CNC	Fresa esférica con d = 10 mm	2000	300
Barrido 3	Fresadora CNC	Fresa esférica con d = 10 mm	2000	350

Tabla 4.2: velocidades de las distintas operaciones de mecanizado

Hay que tener en cuenta que estos datos son orientativos, ya que la velocidad de giro y avance se pueden (y se deben) cambiar durante el proceso en la propia máquina, ajustando así el proceso de manera que veas que va a la velocidad suficiente para no poner en peligro la integridad de la herramienta y/o la pieza durante el proceso. De esta forma, se pueden fijar

igualmente macros de aproximación y alejamiento para determinar el movimiento en vacío (con G00) de la herramienta, con el objeto de acelerar el proceso de mecanizado.

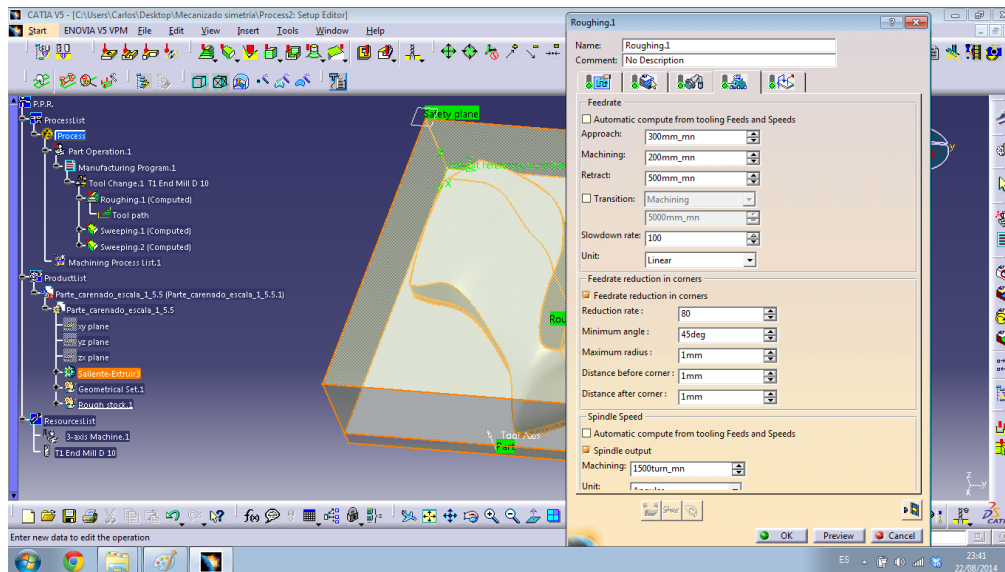


Figura 4.15: Cuadro de velocidades en CATIA

Una vez hecho todo esto, lanzamos la simulación del desbastado clicando en la esquina inferior derecha del cuadro de opciones.

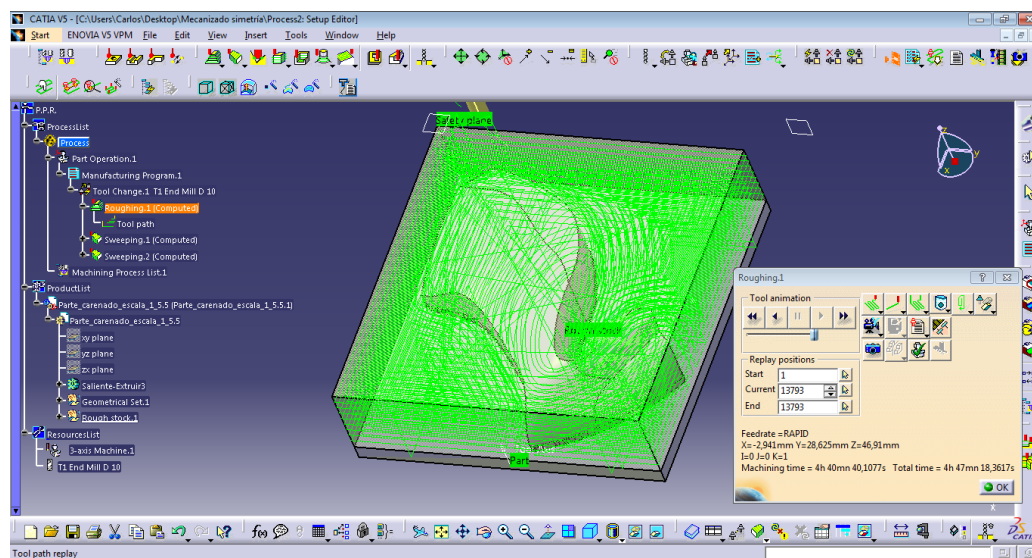


Figura 4.16: Tiempos y trayectoria de la herramienta en la operación de desbastado

En esta pantalla se presenta el tiempo que tardará en ejecutarse la operación, según las velocidades seleccionadas anteriormente, junto con la trayectoria que seguirá la herramienta en el proceso. Si le damos al icono en el que aparece la cámara de vídeo, se lanzará un vídeo con la simulación del proceso.

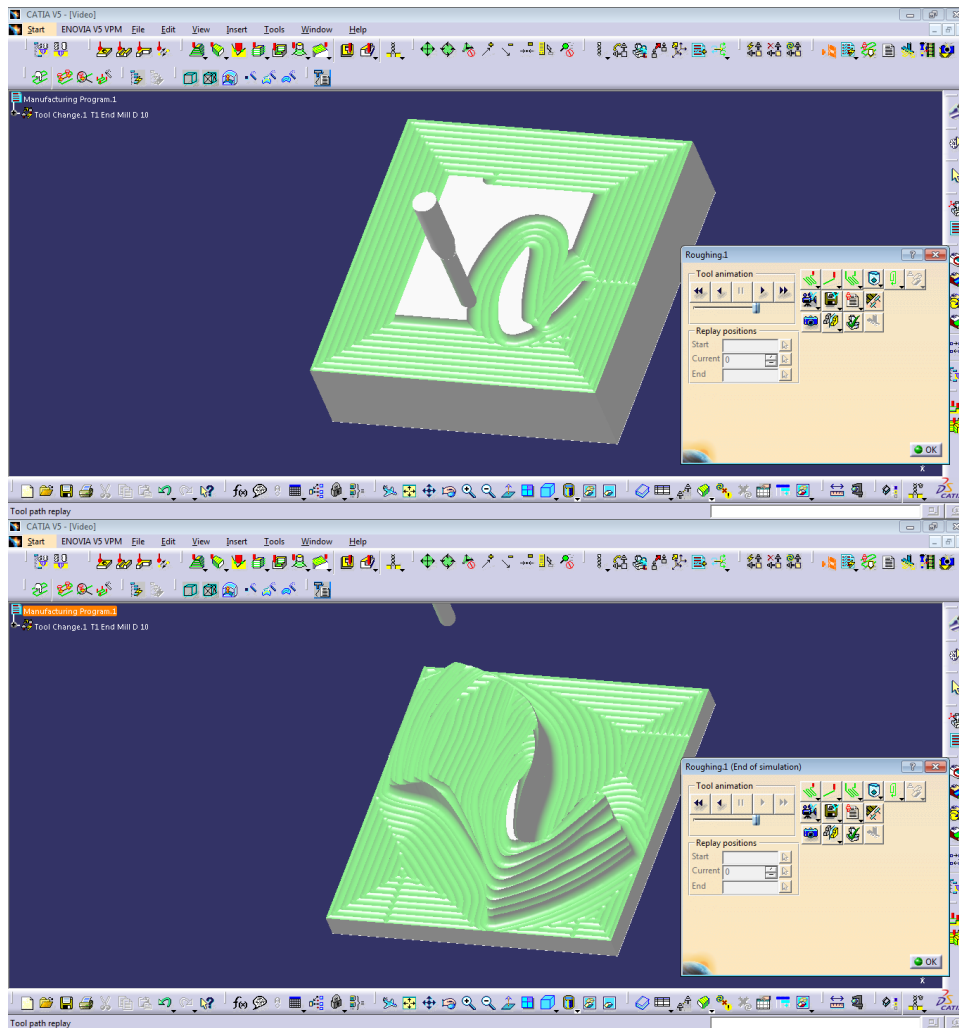


Figura 4.17: Simulación del proceso de desbastado

Como vemos, el acabado final de esta operación es poco deseable, por ese motivo se planificaron anteriormente dos operaciones de acabado (o “barrido” en la terminología de CATIA) después, mejorando así la superficie final considerablemente. Para realizar esta operación, volvemos a pulsar “Manufacturing Program” y esta vez seleccionamos la opción “Sweeping”. Los diferentes campos que nos aparecen son muy similares a los anteriormente vistos, aunque ahora seleccionaremos un movimiento de la herramienta en zigzag y el la dirección perpendicular al plano YZ.

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

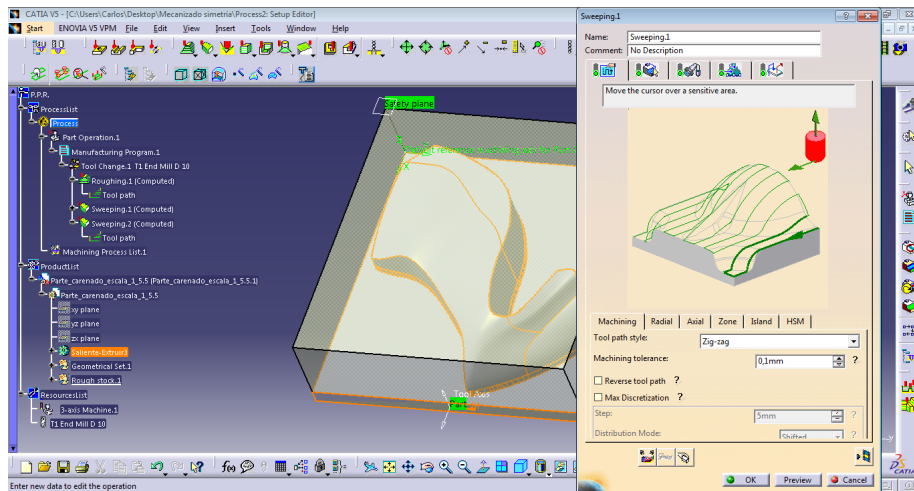


Figura 4.18: Opciones de barrido

Al lanzar la simulación volvemos a obtener los datos del tiempo que durará la operación y la trayectoria que seguirá la herramienta.

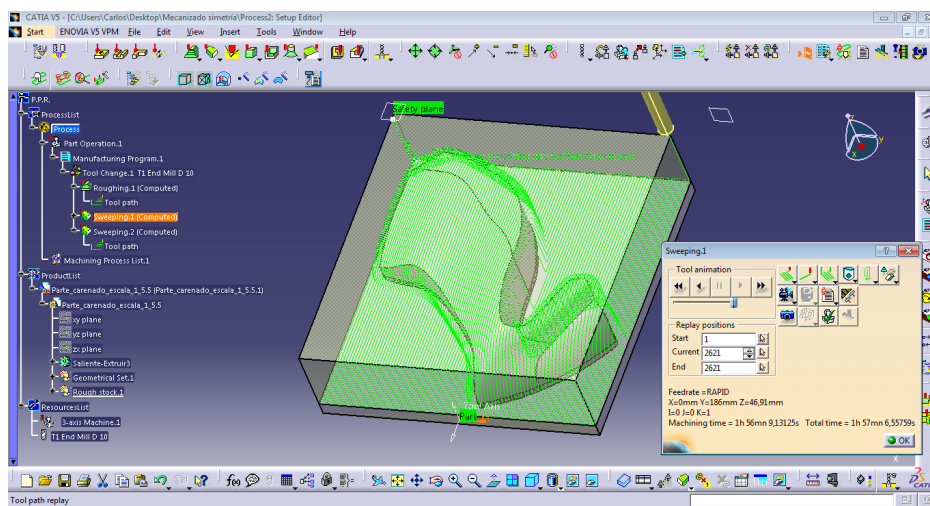


Figura 4.19: Tiempo y trayectoria de la herramienta en la primera operación de barrido

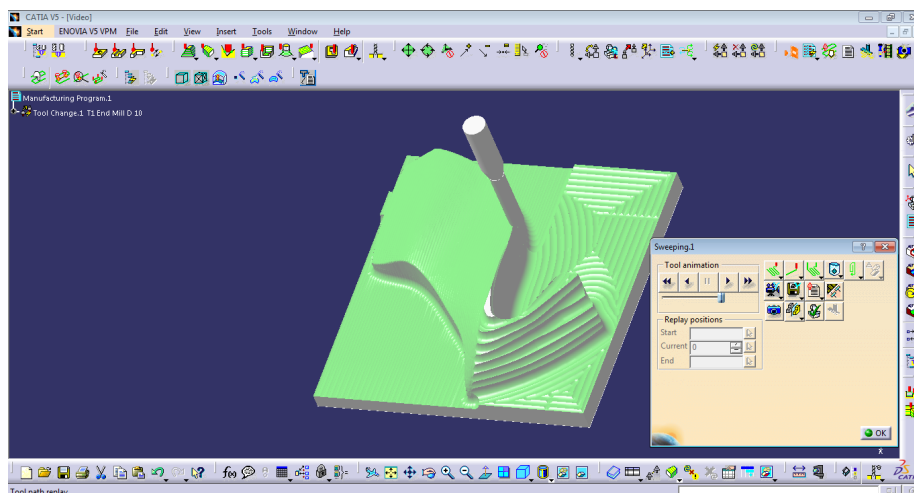


Figura 4.20: Simulación de la primera operación de barrido

Como vemos ahora, el acabado es bastante mejor, ya que esta es una operación de mayor precisión. Para finalizar, volvemos a hacer una operación de barrido, pero esta vez en la dirección perpendicular al plano XZ, consiguiendo así reducir las pequeñas “crestas” que quedan debido al hueco que deja la herramienta esférica entre pasadas. Después de las tres operaciones obtenemos el acabado final.

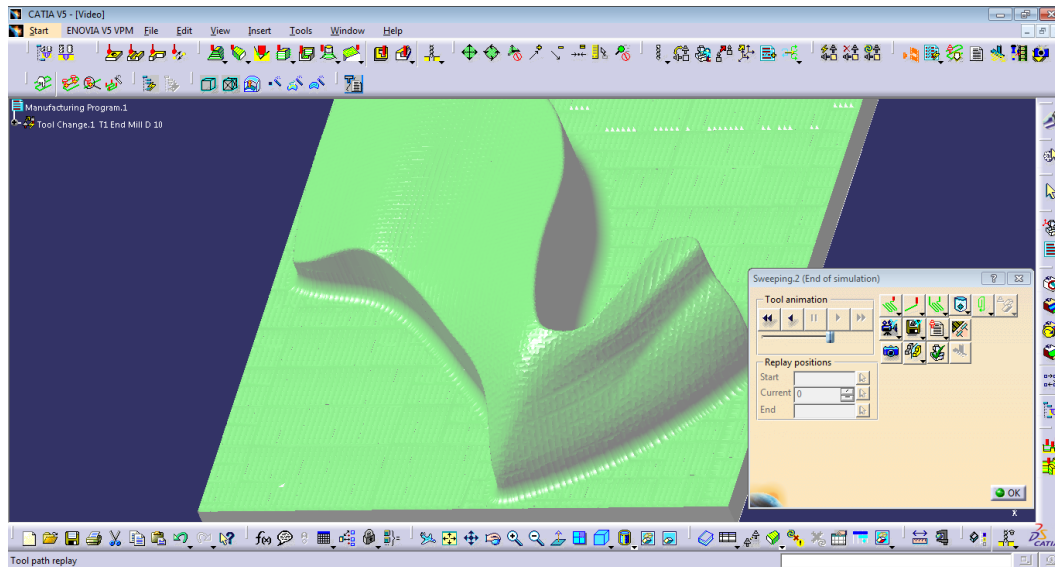


Figura 4.21: Acabado final

El acabado final es muy bueno, pero sin embargo quedan algunas pequeñas irregularidades, aunque como se trata de madera, se solucionará fácilmente con un pequeño lijado. Si se hubiera trabajado con otro material, la solución hubiese pasado por aumentar el porcentaje de solape entre las distintas pasadas de la herramienta.

Una vez acabadas y simuladas todas las operaciones, si todo ha ido correctamente, se procederá a obtener el código G, que es el que indica los movimientos de la herramienta y todas las órdenes que ha de seguir la fresadora CNC. Para esto, pinchamos el icono de “Generate NC Code”, seleccionamos “NC Code” en el tipo de datos de salida y generamos un código para todo el proceso, aunque si se quiere también se puede separar por operaciones. En nuestro caso, hemos generado el código para el lenguaje de control Fagor 8055, que es el que gobierna nuestra máquina de CNC.

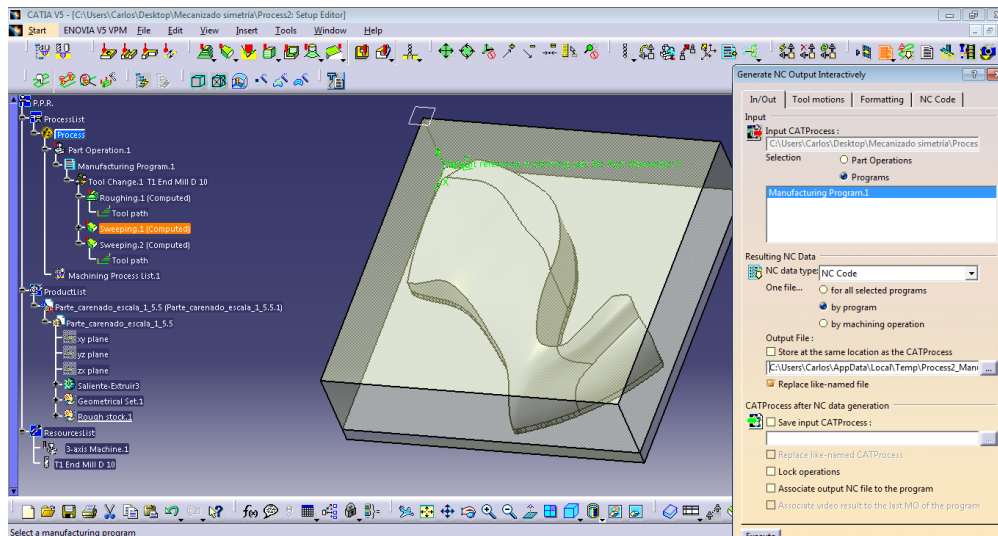


Figura 4.22: Generación del código

El software genera un archivo .nc con el código completo de las operaciones de mecanizado, que debe ser simulado previo a su uso en la máquina de CN. De esta forma se pretende evitar cualquier tipo de trayectoria mal calculada o no compensada, que acarree colisión en el mecanizado real. Por otro lado, CATIA establece por defecto la lubricación (M08) al comenzar la fresa a girar, aunque en nuestro caso, al mecanizar con madera, esta operación puede ser obviada. En su lugar contamos con un chorro de aire comprimido que limpia la viruta de la fresa. También hay que asegurarse de que se compensa la herramienta (G40 y G44) y de que en la máquina se escoge en nuestro caso, T1 como la fresa semiesférica de 10 mm de diámetro. La simulación y puesta a punto del código ISO se realiza mediante el software WinUnisoft, (de ALECOP S.C.A) que se encarga de enviar los proyectos de mecanizado a la máquina de CN Odisea (del mismo fabricante). Dentro de WinUnisoft se crea un proyecto de mecanizado, definiendo el tocho, la herramienta, y se realiza la simulación. Sólo cuando el programa no presente ninguna incidencia en la simulación, se envía a la máquina.

```
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
%1000
N5 G80 G40 G17 G94 G90 G44 G98
N10 T1 D1
N15 M06
N20 S1500 M03
N25 G00 X110.57 Y195.35
N30 G43 Z50.1
N35 G01 Z40.1 F300. M08
N40 Y187.25
N45 X191.71 F200.
N50 X192.71 F160.
N55 Y186.25
N60 Y1. F200.
N65 Y0 F160.
N70 X191.71
N75 X1. F200.
N80 X0 F160.
N85 Y1.
N90 Y186.25 F200.
N95 Y187.25 F160.
N100 X1.
N105 X109.57 F200.
N110 X110.57 F160.
N115 Y186.25
N120 Y184.88 F200.
N125 Y183.5
N130 Y182.5 F160.
N135 X111.57
```

Figura 4.23: Principio del código generado



Figura 4.24: Fresadora CNC junto con la simulación en WinUnisoft

4.4 Mecanizado

Para obtener el carenado completo, fue necesario diseñar dos moldes simétricos a partir de sendos tochos de madera. Para obtener información práctica de cara a futuros mecanizados y optimizar los parámetros de diseño del proceso de CAM, se variaron aspectos como el solape de la herramienta, de forma que se pudiese estudiar su efecto en el tiempo total de mecanizado y el acabado final.



Figura 4.25: Mecanizado del primer molde con un solape de la herramienta de la mitad del radio



Figura 4.26: Fin del mecanizado del primer molde

Después acabar el mecanizado, en ambos casos fue necesario un pequeño lijado para mejorar el acabado superficial. La figura muestra como queda el tocho antes y después de todo el proceso.



Figura 4.27: Tocho antes y después del proceso

Como se comentó anteriormente, para hacer el segundo molde se utilizó un solape de la herramienta igual al radio, 5 mm de avance en cada pasada para nuestro caso. Esto hace que la herramienta corte mucha más área por pasada, lo que reduce el tiempo de trabajo, siempre y cuando la máquina posea potencia suficiente para arrancar el material. En el presente caso fue

necesario jugar en la máquina con el porcentaje de avance fijado en la simulación CAM.



Figura 4.28: Mecanizado del segundo molde con un solape de la herramienta igual al radio

La fotografía anterior corresponde con la parte final del desbastado, donde se puede apreciar como un solapamiento mayor de la herramienta, astilla la madera consiguiendo un peor acabado. De todas formas, en las operaciones de barrido se consiguió un buen acabado final, aunque hizo falta bastante más trabajo de lijado en este molde para conseguir la misma calidad superficial que en el anterior. También hay que decir que los moldes son de madera de pino, bastante blanda, por lo que es más fácil que se astille, aunque se puede trabajar a más velocidad que con otras maderas, como la de olivo, que es más dura pero deja un mejor acabado.

4.5 Termoconformado

El siguiente paso en el proceso de fabricación es el termoconformado del carenado haciendo uso de los moldes mecanizados previamente. El plan de fabricación a seguir será el siguiente:

- Preparación de los moldes para el termoconformado.
- Recorte y secado de las láminas de ABS para que se puedan utilizar en la máquina.
- Termoconformado de los dos moldes.
- Recortar y perfilar las piezas obtenidas del termoconformado.

En este sentido, el Área de Ingeniería Mecánica dispone de una máquina de termoconformado con las siguientes características:



In Partnership with

Item Code: **HME Code: HME4151**

Description: **Thermoforming Centre 911**



The Product:

A versatile and easy to use machine that allows for 6 thermoforming processes to be achieved from one machine.

Features:

- **Vacuum forming:** Sheets 305 x 305 mm, allow a maximum mould height of 115 mm.
- **Dome blowing:** Using cast acrylic or PVC sheet, with supplied rings, allows domes of Ø305, 225 and 150 mm to be produced.
- **Plastic dip coating:** A 5 litre tank containing thermoplastic powder, aerated by compressed air – allows smooth plastic coating to be applied to heated metal.
- **Injection moulding:** Material is heated in oven, transferred to the injection moulding unit and injected into a suitable mould (2 moulds supplied).
- **Extrusion:** Heated material extruded through an I section nozzle into a cooling water tube.
- **Plastic welding:** Integral hot air torch for welding.

Construction:

- Robust steel construction.

Included:

- Fold up work table and a calibrated tilting stop for setting angles. (for Plastic welding).
- Fitted with castors.

Health & Safety Considerations:

Colour:

Grey / Red

Weight:

174 kg

Dimensions:

W 1800 x D 760 x H 1270 mm.

Power:

240V/1phase/50Hz Part No. HME4151

Installation:

Portable / mobile unit.
Fitted with 13 amp plug.

Options:

General Maintenance:

12 monthly safety test.

Life Cycle Details:

15 years, subject to use as per manufacturer's instructions

Guarantees:

12 months Manufacturer's Warranty.

0801SDS – B9066

Tabla 4.3: Características técnicas de la máquina de termoconformado (www.hme-tech.com)

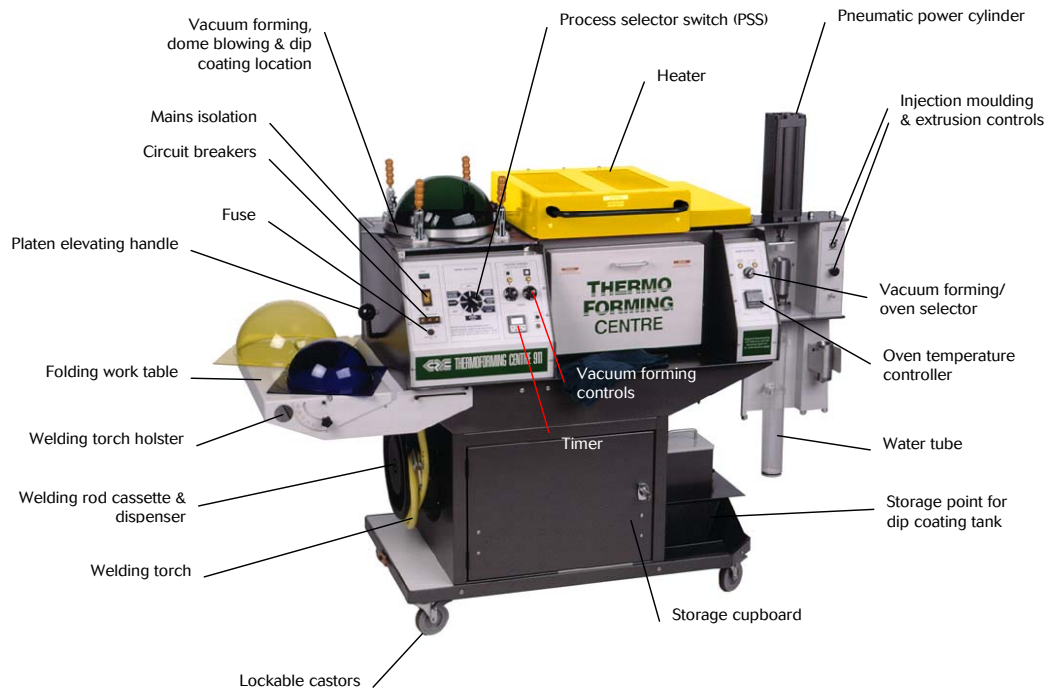


Figura 4.29: Diferentes accesorios de la máquina de termoconformado (www.crclarke.co.uk)

Para fabricar la pieza de carenado se ha elegido una plancha de ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) de 2 mm de grosor. El rasgo más importante del ABS es su gran tenacidad, incluso a baja temperatura (sigue siendo tenaz a -40 °C). Además es duro y rígido tiene una resistencia química aceptable, buena estabilidad dimensional, alta resistencia a la abrasión y se recubre con una capa metálica con facilidad. El ABS se puede, en una de sus variantes, cromar por electrólisis dándole distintos baños de metal a los cuales es receptivo.

Propiedades físico – mecánicas

Alargamiento a la rotura (%)	45
Coefficiente de fricción	0,5
Módulo de tracción (GPa)	2,1-2,4
Resistencia a la tracción (MPa)	41-45
Resistencia al Impacto Izod (J/m)	200-400
Absorción de Agua – en 24 h (%)	0,3-0,7
Densidad (g/cm³)	1,05
Resistencia a la radiación	Aceptable
Resistencia a los ultra-violetas	Mala

Tabla 4.4: Característica físico-mecánicas del ABS (www.wikipedia.org)

Como hemos visto, el ABS es un material higroscópico, lo que quiere decir que absorbe humedad del ambiente, si no se seca convenientemente antes del termoconformado, se producen una serie de rugosidades que arruinan el acabado final. Para secar el ABS se introduce en el horno de secado a 70/80 grados centígrados durante dos horas.

La pieza se fabricará mediante un proceso de termoconformado al vacío.

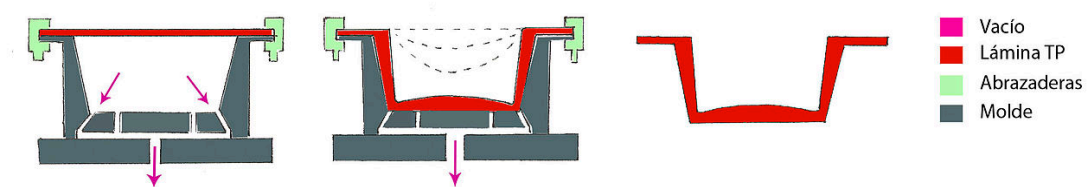


Figura 4.30: Proceso de termoconformado al vacío (www.wikipedia.org)

Este proceso consiste en sujetar la lámina de plástico en una estructura y calentarla hasta llegar al estado gomoeástico, para colocarlo sobre la cavidad del molde y que se adapte a su geometría. Se elimina el aire mediante presión conseguida por vacío, que empuja la lámina contra las paredes y contornos del molde. Una vez que ha enfriado, se extrae la pieza.

Cuando se ha secado el plástico, se coloca en el centro de termoconformado, la máquina trabaja con láminas de plástico de 305x305 mm. Se asegura bien la lámina con las mordazas y se calienta la placa móvil del horno hasta 160 °C. Cuando está caliente, se coloca sobre la lámina de plástico.

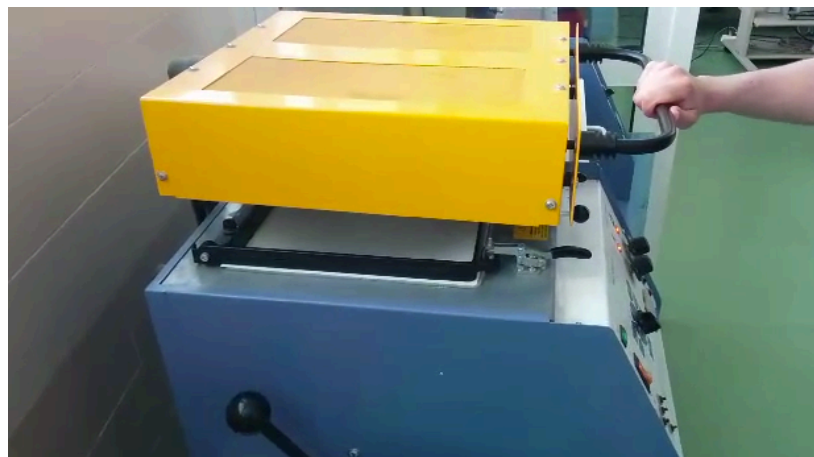


Figura 4.31: Calentado de la plancha de ABS

Al pasar 2 minutos, la lámina empezará a doblarse, constituyendo el momento en el que se debe retirar la placa calefactable.

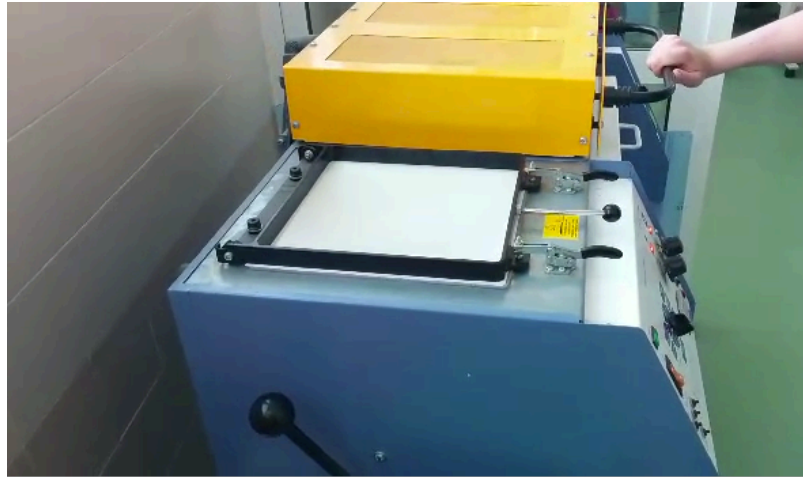


Figura 4.32: Retirada de la placa calefactable

A continuación se activa la bomba de vacío, la cual retira el aire dentro de la cavidad, haciendo que la lámina se adhiera al molde por acción de la presión atmosférica. Para evitar que se quede aire atrapado entre el molde y la lámina, se le hacen unos pequeños agujeros al molde para que pueda salir el aire.

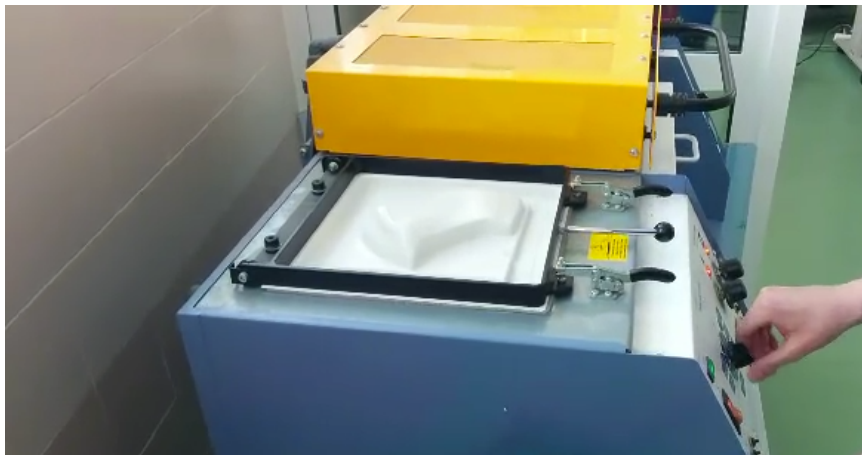


Figura 4.33: Lámina de ABS adaptando la forma del molde

Al hacer esto la lámina toma la forma del molde y se va enfriando hasta que vuelve a recuperar su rigidez. Cuando estamos seguros de que la lámina se ha enfriado lo suficiente, se activa el soplado, que inyecta aire en vez de hacer el vacío, ayudando a separar el molde de la pieza ya formada.



Figura 4.34: Lámina de ABS después del termoconformado

Como consecuencia de ligeros desajustes en el mecanizado, asociados a la pérdida del cero en el eje Z cada vez que la máquina de CNC se apagaba, los moldes de madera poseen algunos surcos poco profundos que quedan marcados en el carenado de plástico. Para solventar tal incidencia, se utilizó una masilla cerámica para recubrir los huecos y una vez seca se lijo y pulió el molde.



Figura 4.35: Moldes mejorados con masilla cerámica y algunos ejemplos de las piezas obtenidas

A la derecha de la imagen se puede apreciar la primera pieza, ya sin el resto sobrante de la lámina, fabricada con el molde antes de rellenarse mediante masilla. A la izquierda y en el medio podemos ver dos piezas fabricadas con el molde arreglado. La diferencia de calidad en la pieza es notable, una vez comprobado que la masilla daba resultados satisfactorios, se procedió a un arreglo más exhaustivo de los moldes y se fabricaron las piezas definitivas del carenado, las cuales se recortaron y perfilaron posteriormente con una fresadora manual para ajustarse bien a la forma y eliminar cualquier tipo de rebaba.

4.6 Impresión 3D

Para fabricar el resto de la moto, se utilizará una impresora 3D. En este caso utilizaremos el software libre Cura de Ultimaker para generar el código ISO de la impresión, muy parecido al anteriormente visto para la fresadora CNC. La impresión la realizaremos con una impresora 3D bq Witbox, disponible en el Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Jaén. El plan de fabricación a seguir será el siguiente:

- Convertir la geometría diseñada en SolidWorks del resto de la moto a un formato con el que poder trabar en Cura.
- Simulación y optimización de los diferentes parámetros de impresión.
- Impresión del resto de la moto con el código previamente generado.
- Limpieza y perfilado de las piezas fabricadas.

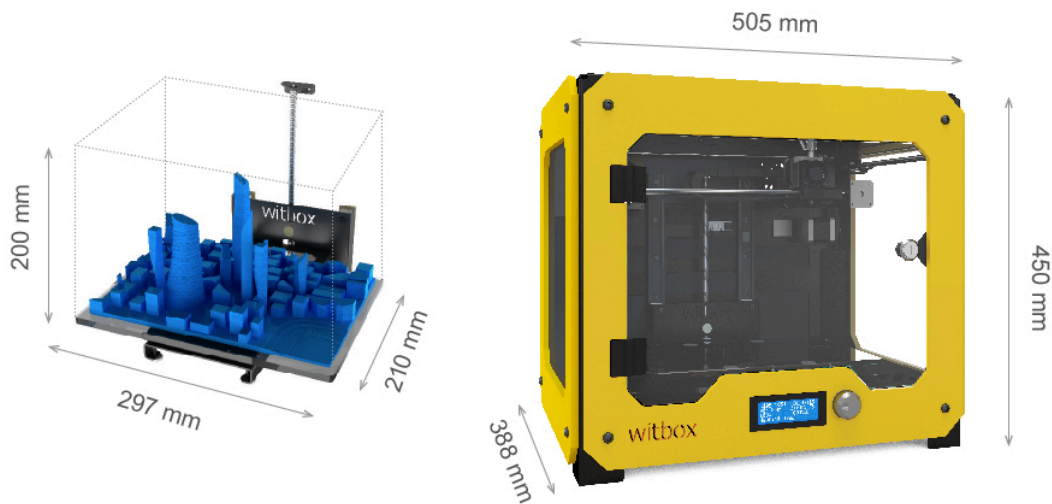
La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición, donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Las impresoras 3D ofrecen a los desarrolladores de producto, la capacidad para imprimir partes y montajes hechas de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de montaje. Las tecnologías avanzadas de impresión 3D, pueden incluso ofrecer modelos que pueden servir como prototipos funcionales de producto.

Desde 2003 ha habido un gran crecimiento en la venta de impresoras 3D. De manera inversa, el coste de las mismas se ha reducido. Esta tecnología también encuentra uso en los campos tales como joyería, calzado, diseño industrial, arquitectura, ingeniería, construcción, automoción, sector aeroespacial, industrias médicas, educación, sistemas de información geográfica y muchos otros.

La máquina de la que se dispone es una impresora de modelado por deposición de fundente, es una tecnología desarrollada por la empresa Stratasys, usa una tobera para depositar polímero fundido sobre una estructura soporte, capa a capa.

La impresora cuenta con las siguientes características técnicas:

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



Electrónica	Ramps 1.4 Pantalla de LCD con encoder rotativo con pulsador para la navegación Cartucho calefactor 40W 12V	Mega 2560 Fuente de alimentación de 348W Termistores 100k en extrusor
Resolución	Alta 50 micras Baja 300 micras	Media 200 micras
Velocidad de impresión	Velocidad recomendada 60 mm/sec Diámetro filamento: 1,75 mm	Velocidad máxima recomendada 80 mm/sec
Dimensiones	Dimensiones área de trabajo: Tamaño DIN A4 x 20 cm altura Dimensiones caja: 64cm x 55cm x 65cm	Dimensiones impresora: Largo 505 mm Ancho 388 mm Alto 450 mm
Materiales	PLA	
Mecánica extrusor	Extrusor único Boquillas de 0.4 mm	Extrusor de diseño propio Toberas de refrigeración de pieza
Seguridad	Máquina cerrada con seguridad en puerta	
Software	Firmware Marlin preconfigurado Slic3r (recomendado y preconfigurado)	Hosts compatibles Repetier, Pronterface, Cura, ReplicatorG Skeinforge
Comunicaciones	Lector de tarjetas SD y tarjeta de 4 GB incluida	Puerto USB
Contenido de la caja	1 bobina de PLA de regalo Herramientas para llevar a cabo la sustitución del hotend Patas Witbox Base de cristal templado	1 Hotend de repuesto 2 Agujas para mantenimiento de extrusor Spooler Pieza impresa de prueba

Tabla 4.5: Características generales de la impresora 3D (www.bqreaders.com)

4.6.1 Generación del archivo CAD para impresión (STL)

En primer lugar, crearemos la geometría de la moto completa sin carenado, para imprimirla de una sola vez. Volveremos a utilizar SolidWorks como hicimos al principio de la fabricación. Los planos se pueden ver en el anexo 7.1.

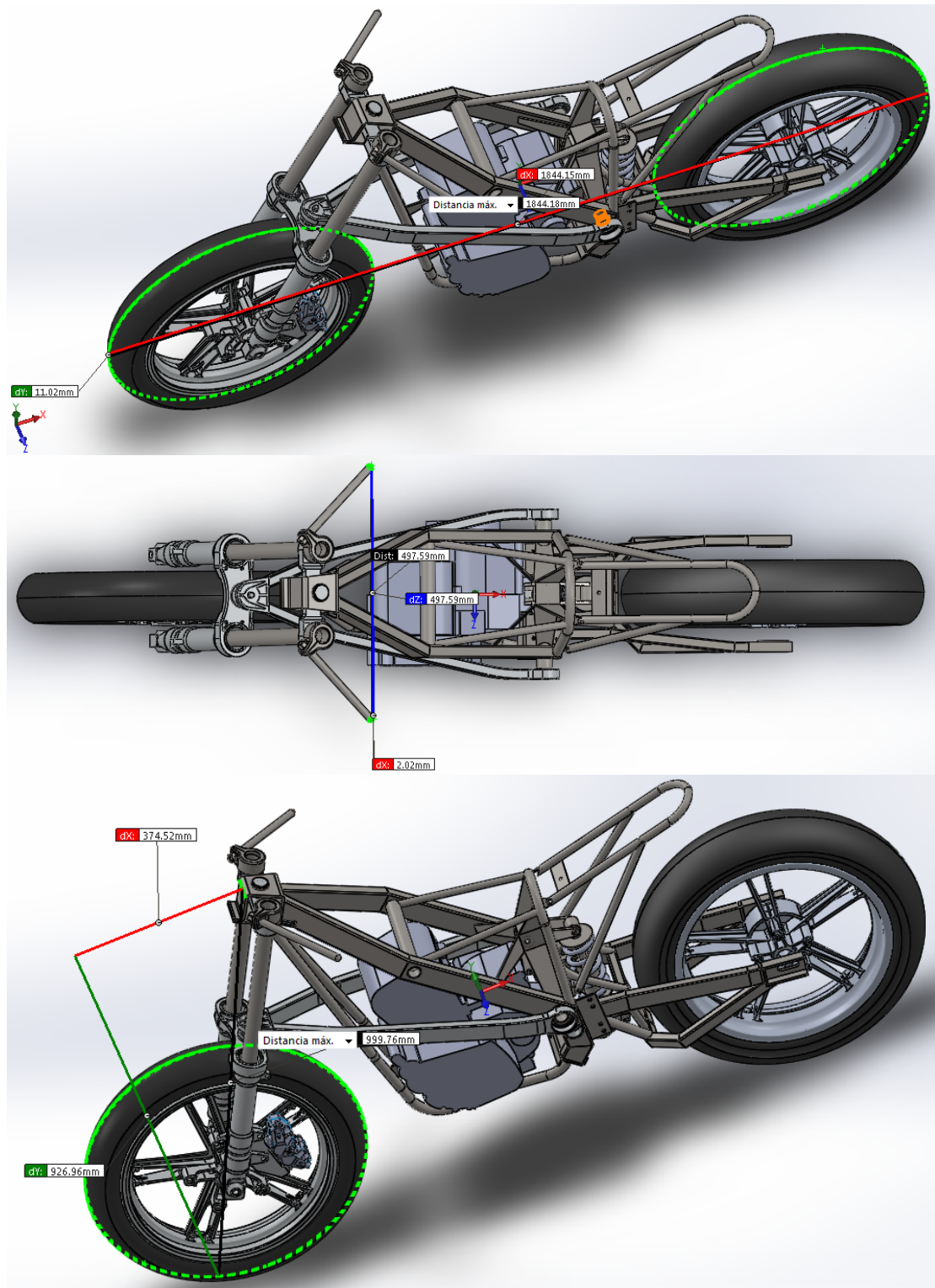


Figura 4.36: Medidas del modelo a escala sin carenado

El principal problema de cara a la impresión, es la complejidad de la geometría. Por tanto, es necesario simplificar las partes más complicadas, ya que son muy difíciles de obtener con precisión en una impresora de moldeo por deposición fundida. Una vez hecho esto, se convierte el archivo a .stl, este formato de archivo define la geometría de objetos 3D, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas que sí incluyen otros formatos CAD.

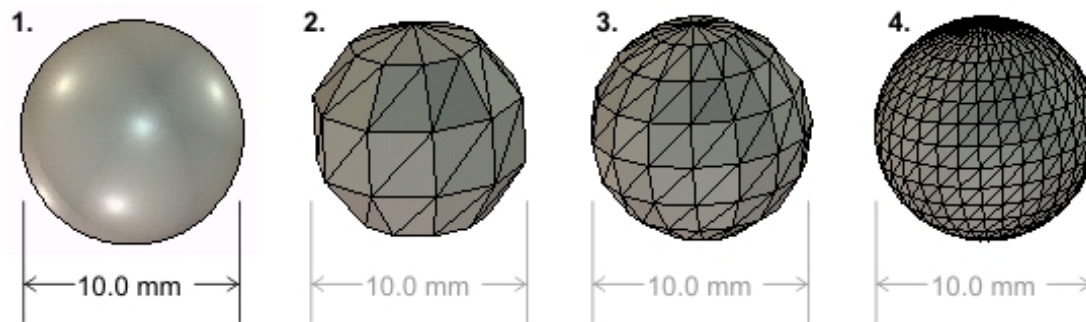


Figura 4.37: Variación del acabado final en función del número de poliedros (www.weacrea.blogspot.com)

El archivo STL es una representación geométrica mediante tetraedros. En concreto, convierte la geometría en un sólido, mallándolo con tetraedros, de forma que cuantos más tetraedros contenga la geometría final, más grande será el archivo .stl, pero tendrá mucha más calidad. El resultado final se aprecia en la siguiente figura

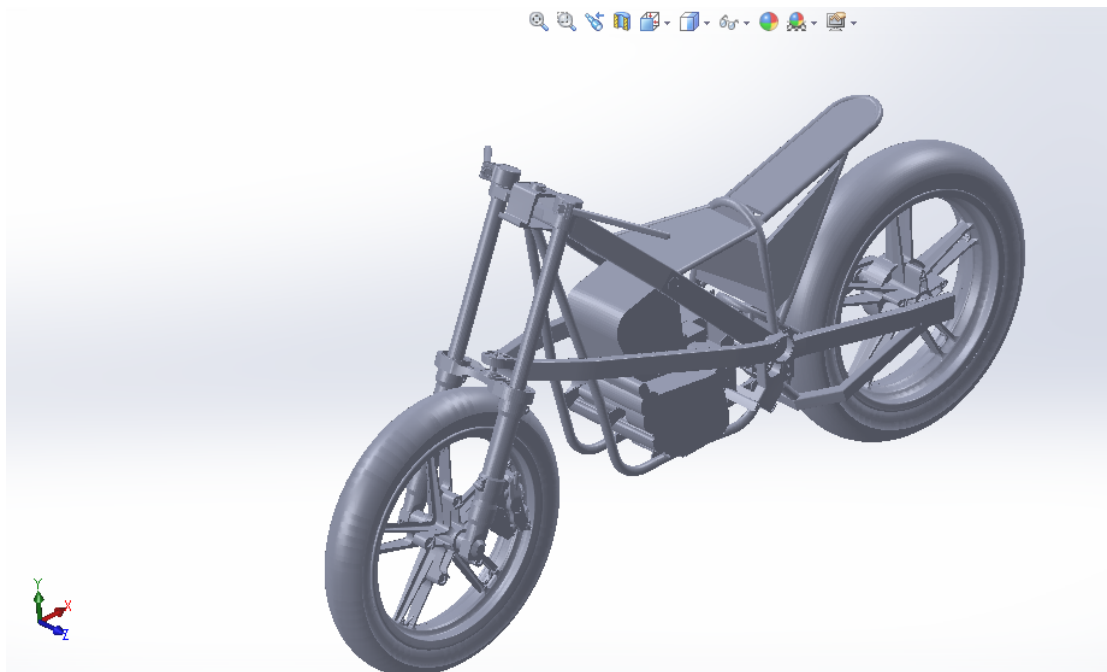


Figura 4.38: Archivo STL de la motocicleta sin carenado

4.6.2 Preparación de la impresión y obtención del código ISO

En primer lugar, procedemos a abrir el Cura y cargar el archivo STL que acabamos de crear. Es necesario modificar todos los campos del programa para que se ajusten a la máquina que estamos utilizando y a las características de la impresión que queremos obtener. Lo primero de todo es definir las características de la maquina, en la pestaña “Machine”.

Como ya hemos dicho antes, esta impresora trabaja con PLA (poliácido láctico), un plástico formado a partir de almidón de maíz completamente biodegradable y con unas características muy parecidas al politereftalato de etileno (PET). Este plástico no necesita que la base sea calefactable, no como las impresoras de ABS, esto se debe a que el coeficiente de dilatación/contracción del PLA es muy pequeño, lo que hace que al enfriarse el plástico no se despegue de la base.

Coeficiente de dilatación lineal (K⁻¹)	7x10 ⁻⁵
Coeficiente de Young (MPa)	2800-3100
Temperatura de transición vítrea (°C)	75
Punto de fusión (°C)	260
Absorción de Agua – en 24 h (%)	0,16
Densidad (g/cm³)	1,37

Tabla 4.6: Característica físico-mecánicas del PLA (www.wikipedia.org)

Introducimos el tamaño de impresión y como contamos con una impresora de PLA, que no necesita que la base sea calefactable, quitamos la opción de base calefactada que viene por defecto. También se dispone de un ventilador de capa en el extremo del extrusor de la impresora, que hace que el plástico se endurezca instantáneamente a la salida, facilitando la adherencia a la base.

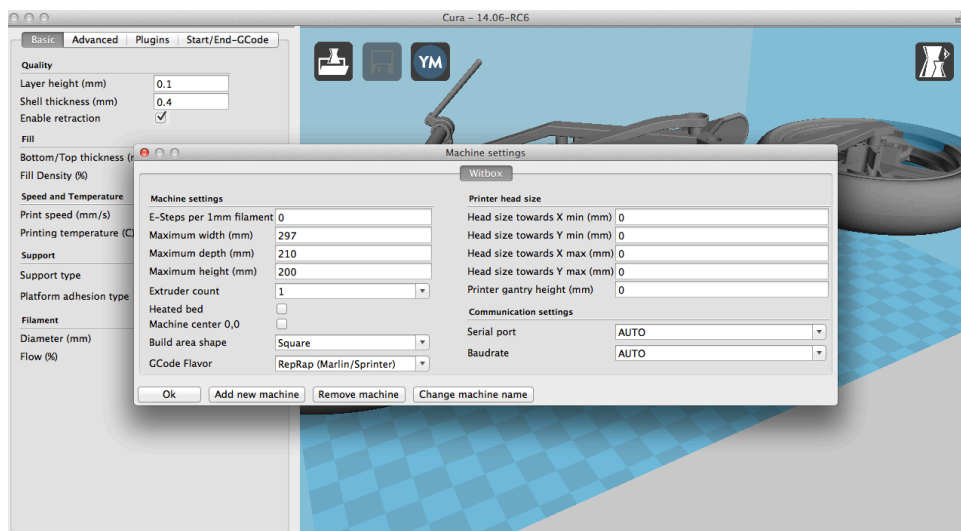


Figura 4.39: Características de la máquina en Cura

Autor: Carlos García Baena

Ahora rellenamos el resto de campos más importantes del proceso de impresión, cuyos valores finales se han fijado tras realizar sucesivas pruebas:

- **Altura de capa:** cuanto menor sea el espesor de cada capa, el acabado final será mejor, ya que no se verán las típicas estructuras en “láminas” que se suelen dar en las impresiones 3D rápidas o de baja calidad.
- **Densidad de llenado:** para las partes macizas de la pieza, se puede reducir la cantidad de material que se usa en rellenarlas, reduciendo esta opción, se rellenan las partes macizas con estructuras aligeradas de hexágonos o cuadrados. En nuestro caso haremos la impresión al 100% de llenado para que sea un bloque macizo.
- **Velocidad de impresión:** cuanto más alta sea ésta, se suele empeorar la calidad de la impresión.
- **Temperatura de impresión:** para el PLA ronda los 210 °C, para otros como el ABS suele ser de 230 °C, aunque varía dependiendo de la variedad de plástico que se use, incluso para el mismo plástico, la incorporación de distintos aditivos que la dan color, puede variar la temperatura 5 o 10 °C.
- **Flujo:** este campo varía la cantidad de plástico que se introduce durante la impresión, normalmente las máquinas viene diseñadas para utilizar esta opción al 100 %, pero si se varía alguna pieza de la máquina, se usa un plástico muy distinto al de diseño, o simplemente se ve que la impresora no consigue rellenar las capas en cada pasada, se puede alterar.
- **Tamaño del extrusor:** en esta opción, que se encuentra en la pestaña de opciones avanzadas, hay que introducir el diámetro de la boquilla del extrusor, esta opción es muy importante ya que ayuda a definir otros parámetros como el espesor de la capa exterior, que tiene que ser un múltiplo entero de este número.

Altura de capa (mm)	0,1
Densidad de llenado (%)	100
Velocidad de impresión (mm/s)	80
Temperatura de impresión (°C)	210
Flujo (%)	100
Tamaño del extrusor (mm)	0,4

Tabla 4.7: Parámetros utilizados en la impresión

Una vez definidas las opciones principales, ya se podría empezar a imprimir cosas, todavía hay algunas opciones como las velocidades de las primeras capas o el espesor de la primera y última capa, que ya se dejan a elección del usuario. En la impresión 3D hay gran variedad de máquinas y tipos de plásticos, no existe una configuración específica para una impresora, sólo la experiencia te puede llevar a conseguir resultados óptimos y a tu gusto con tu máquina.

Ahora se selecciona el tipo de andamiaje, como la moto tiene cavidades internas, seleccionaremos la opción de andamios “everywhere”, esto hará que existan andamios que partan de la base y también de la propia figura. Para la unión a la base se seleccionara la opción “raft”, esta opción crea una serie de capas sobre la base formando una estructura sólida a partir de la cual se empezará a imprimir, esta opción ofrece una gran adherencia, lo que es muy importante a la hora de una impresión tan grande. También hay que colocar la moto de forma que quepa en el área de impresión.

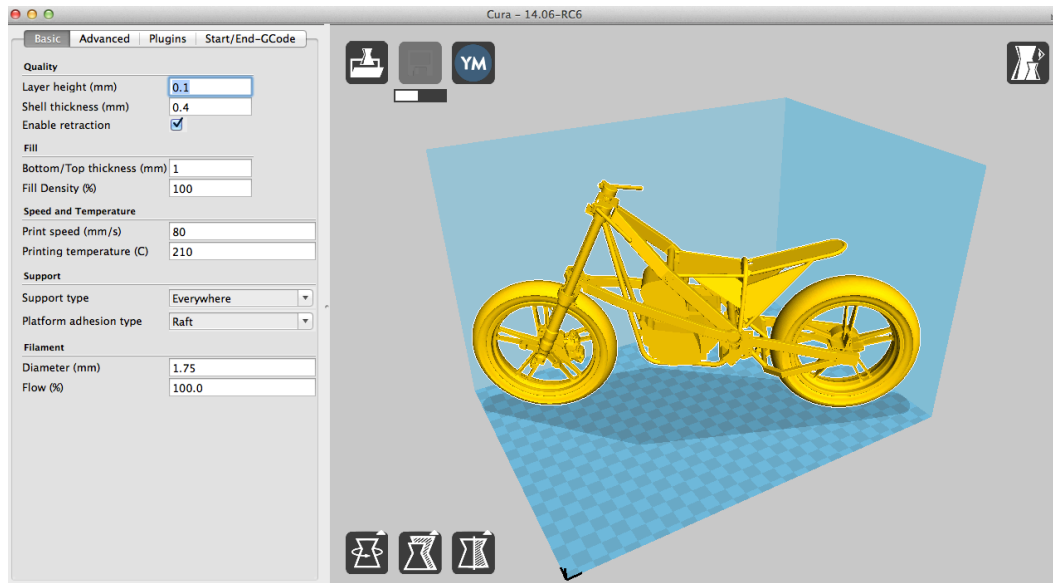


Figura 4.40: Posición de la motocicleta para la impresión

Una vez hecho esto, el programa calculará las trayectorias del extrusor y la base y generará el código de la impresión. Cuando acabe, podremos ver la simulación de la impresión en el árbol desplegable de la esquina superior derecha del programa.

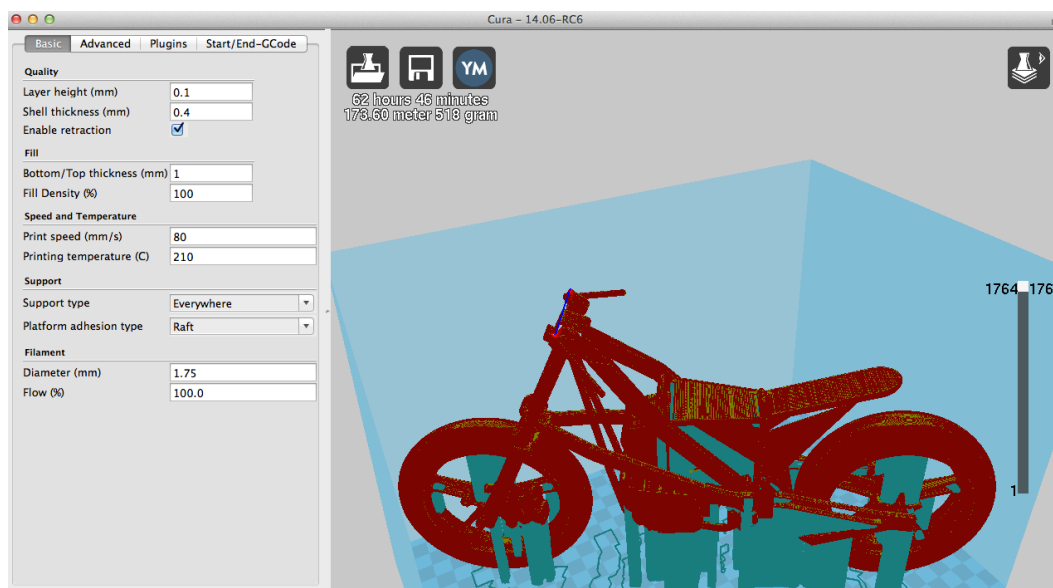


Figura 4.41: Simulación capa por capa de la impresión

Este resultado que hemos obtenido, no sería una buena solución, ya que se ve como los andamios no llegan a varias piezas y estas se generan “en el aire”, esto dará lugar a que la impresora tire el plástico al vacío en esa zona, formando una maraña de hilos que podrían interferir con el resto de la impresión. Como ejemplo, podemos ver como los manillares empiezan a imprimirse directamente en el aire.

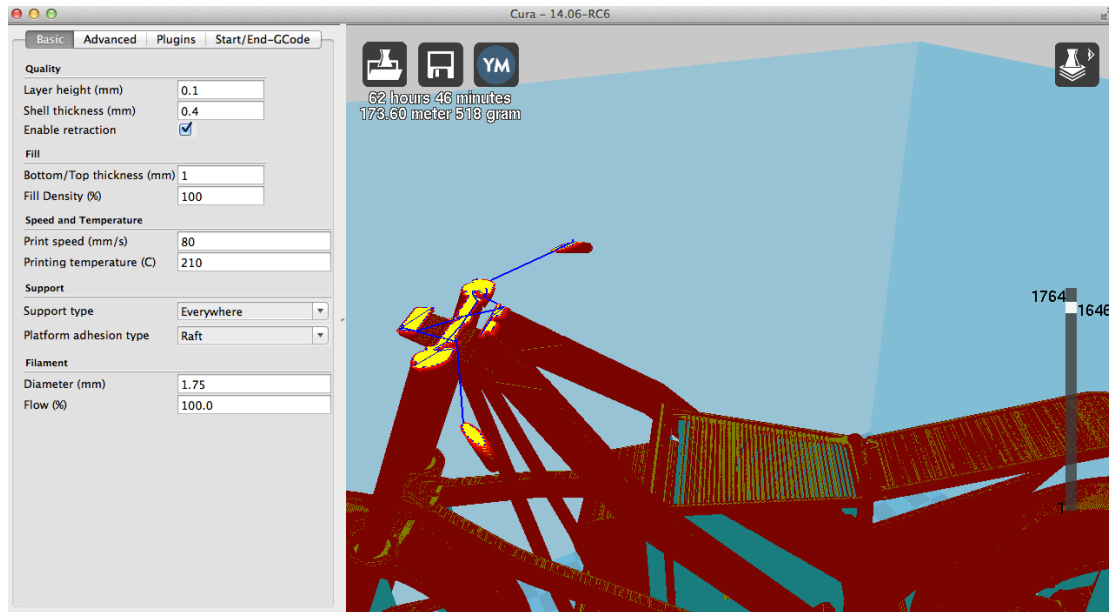


Figura 4.42: Impresión de los manillares sin base de sustentación

Para arreglar esto tenemos que ir a las opciones de experto, en el menú superior del programa y ahí cambiar el ángulo a partir del cual se empiezan a construir los andamios.

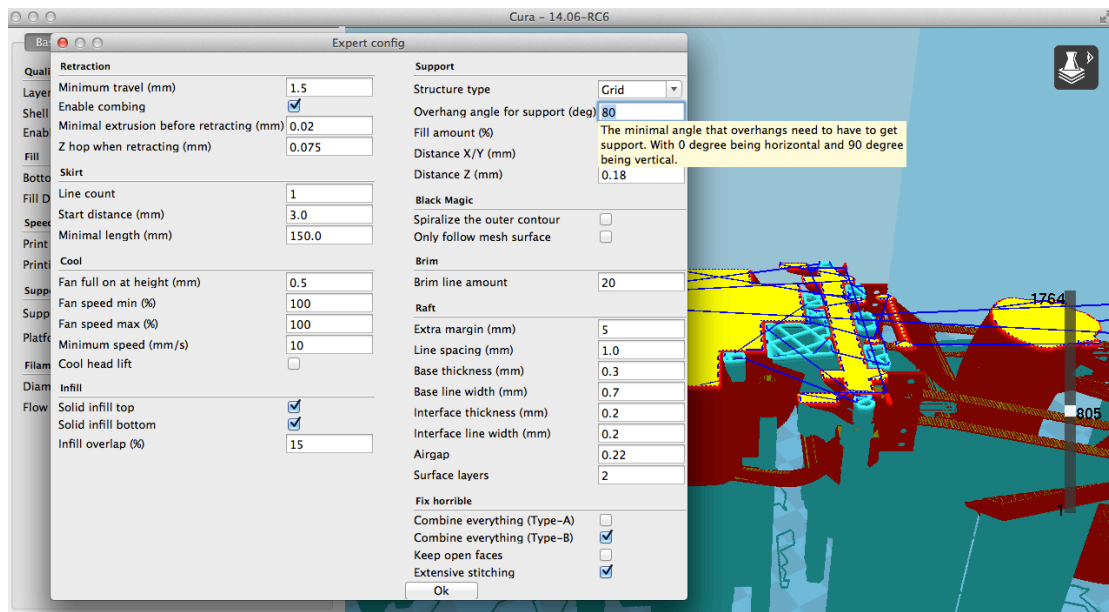


Figura 4.43: Opciones de experto

Este menú tiene una gran cantidad de opciones para variar los parámetros de la impresión, especialmente el apartado de “fix horrible” puede ser decisivo para hacer algunas impresiones de piezas con una geometría complicada, también será muy importante el apartado de “black magic” para hacer piezas huecas. Nos centraremos en reducir el ángulo de solape de los andamios. Una vez cambiado se volverá a iniciar el cálculo automáticamente.

Angulo de solape de los soportes (°, deg)	80
Llenado de los soportes (%)	15
Fix horrible	Tipo – B y costura extensa

Tabla 4.8: Parámetros cambiados de opciones para expertos

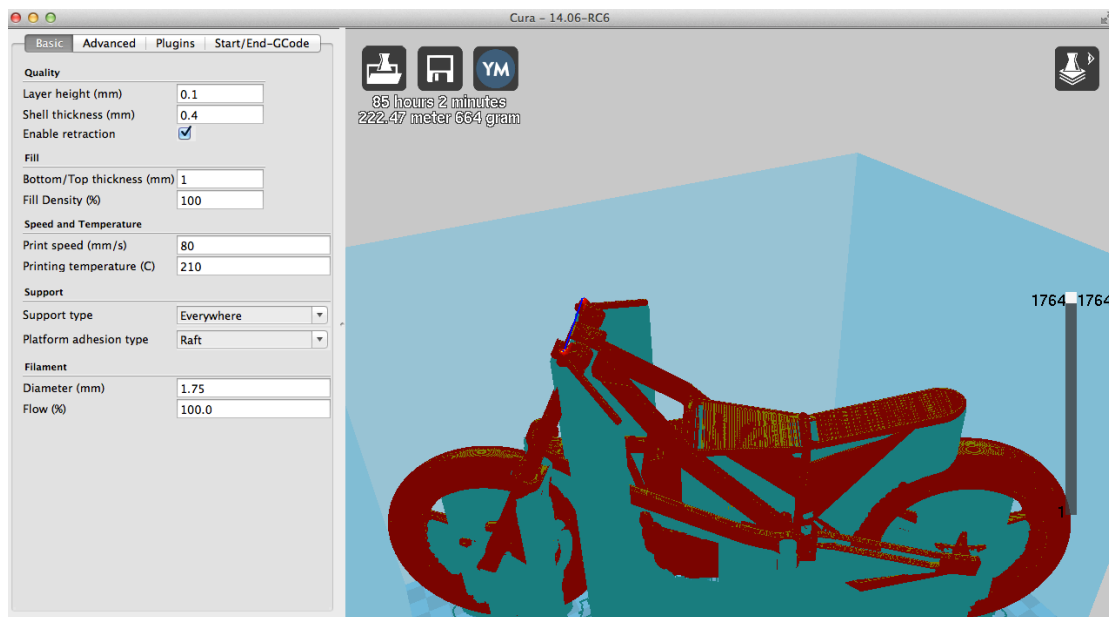


Figura 4.44: Simulación con un mayor ángulo de solape de los soportes

Ahora si hay suficientes soportes como para que se lleve a cabo la impresión de forma correcta, se puede apreciar por ejemplo como ahora los manillares se construyen sobre un andamio que viene desde la base, a la derecha podemos ver cada capa de la simulación y comprobar que no hay ningún error antes de lanzarla. También se puede ver en la parte superior el tiempo que tardará en finalizar la impresión y la cantidad de material que se consumirá en el proceso.

Tiempo (h)	85,03
Hilo consumido (m)	222,47
Plástico consumido (g)	664

Tabla 4.9: Características de la impresión

Cuando todo este terminando, le damos a guardar el código y lo introducimos en la tarjeta SD que viene con la impresora. Antes de empezar a imprimir, se debe calibrar la base de la impresora para asegurarse de que esta bien recta y nivelada. Este proceso consiste en colocar la extrusora sobre 3 puntos de la base, formando un plano, asegurando que en cada uno de los puntos la boquilla del extrusor no toque la base, y en nuestro caso, que haya un poco mas de 0,1 mm de diferencia, ya que nuestro espesor de capa es de 0,1 mm. Hecho todo, se lanza la impresión desde la máquina.

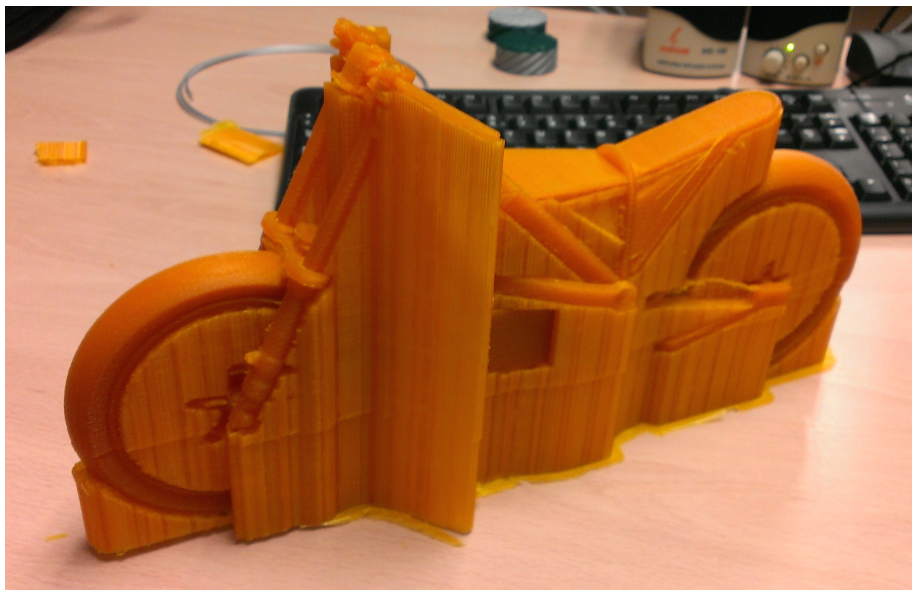
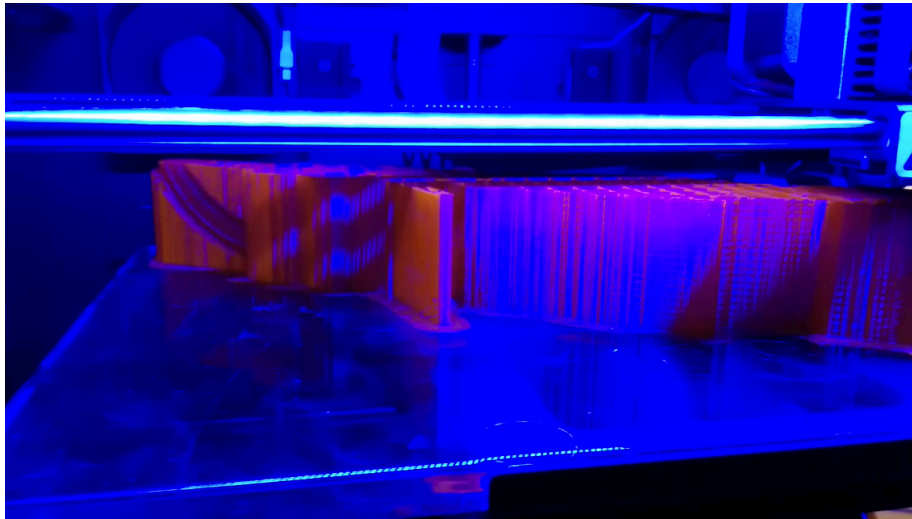


Figura 4.45: Proceso de impresión y acabado final

Una vez impresa la moto, se tiene que proceder a retirar los soportes y limpiarla bien para obtener la pieza original. Algunas impresoras que disponen de 2 extrusores, pueden imprimir los andamios con PLA y la estructura principal con ABS, esto simplifica muchísimo el limpiado de la pieza, ya que el ABS se disuelve en acetona y el PLA en sosa cáustica

(NaOH), por lo que al introducir la pieza en sosa, se conseguiría tener la pieza original sin necesidad de retirar ningún andamio.

Por último, se procede a fabricar el carenado del depósito y del colín, siguiendo un procedimiento análogo al explicado anteriormente. En este sentido, primero creamos la geometría en 3D con SolidWorks y la convertimos a .stl para introducirla en Cura.

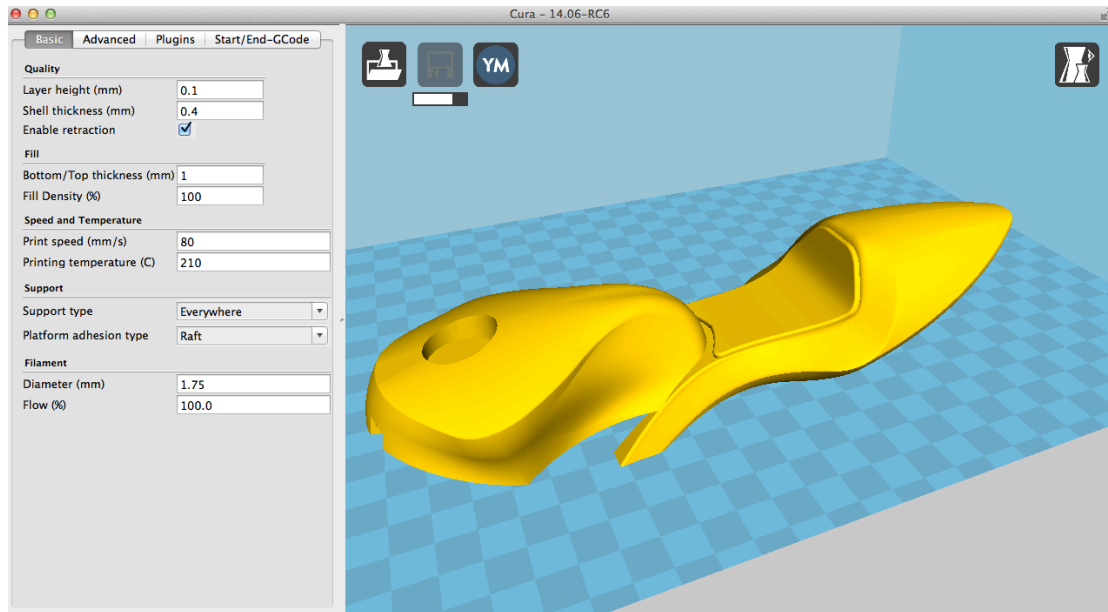


Figura 4.46: Geometría del carenado del depósito y el colín en Cura

Esta parte del carenado se ha hecho maciza, pero se ha extruido un corte dentro del colín para que se pueda acoplar a la moto impresa. Esto se puede apreciar con la opción de vista “X-Ray”.

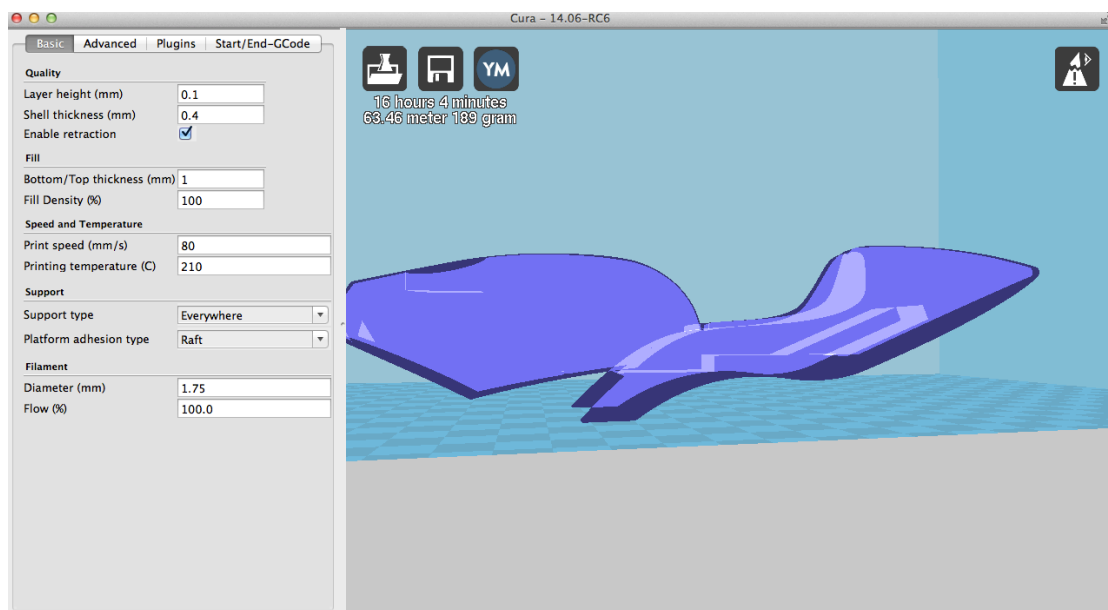


Figura 4.47: Cavidad de acople al subchasis de la motocicleta

Ahora se genera el código y se lanza la impresión en la máquina.

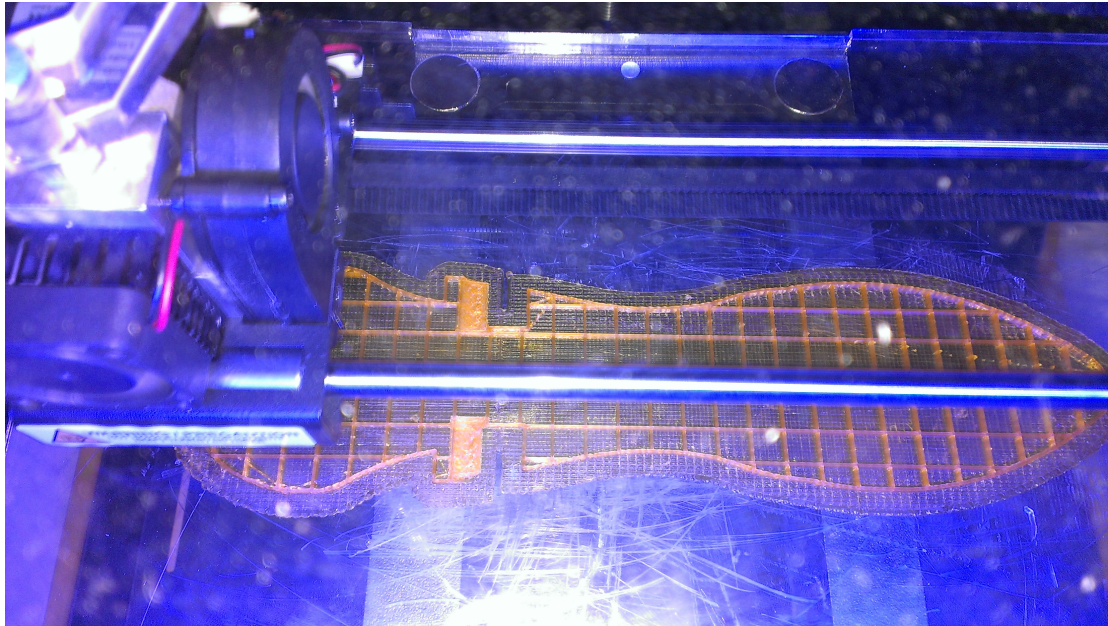


Figura 4.48: Proceso de impresión del carenado de depósito y colín

En la imagen anterior se pudo apreciar el “raft” y las primeras capas de la pieza, en las que se puede ver la diferencia entre la estructura interna de los andamios y la de la pieza.



Figura 4.49: Acabado final de la impresión del carenado de depósito y colín

Debido a que tenemos una cavidad interna, la posición en la que se coloca la pieza es clave, ya que si se imprime en la posición que se ve arriba, serán necesarios andamios internos para sostener la cavidad, pero estos luego serán extremadamente difíciles de retirar debido a la posición del hueco. Para que no haya que hacer andamios en la cavidad, se inclinará la pieza de manera que no hagan falta.

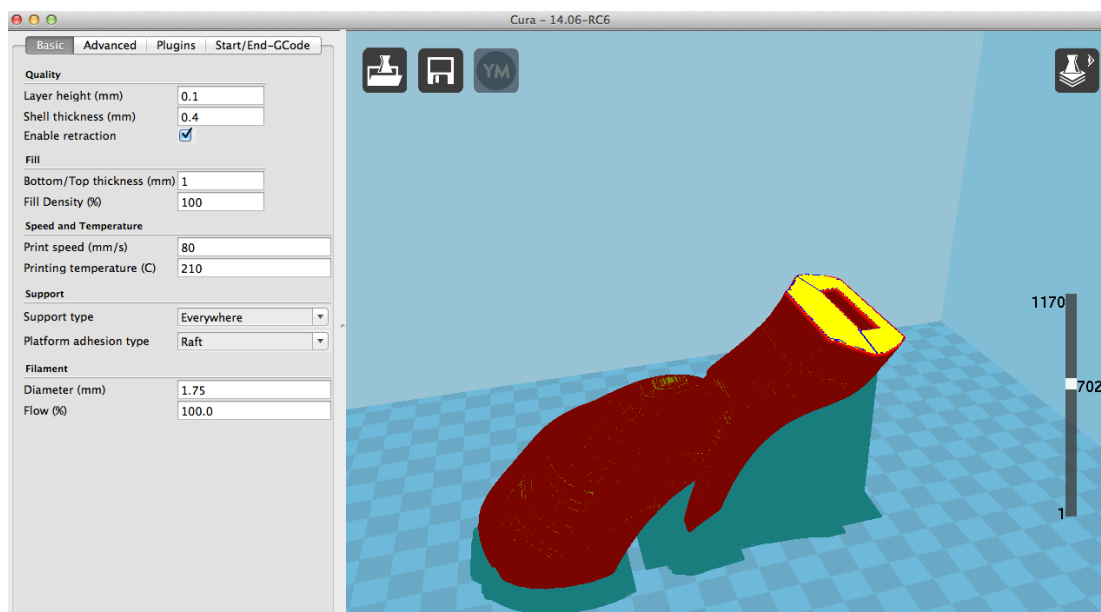


Figura 4.50: Simulación del carenado final con la cavidad de acople

Haciendo esto ya se podrán retirar los andamios cómodamente y se podrá fabricar la pieza definitiva.

Tiempo (h)	18,6
Hilo consumido (m)	69,45
Plástico consumido (g)	207

Tabla 4.9: Características de la impresión

4.7 Ensamblaje del conjunto y pegado.

Para montar el conjunto, es necesario disponer de una base sobre la que se ensamblen las piezas fabricadas. La base de acero a fabricar servirá de soporte para la moto cuando se introduzca en el túnel de viento, posee una lámina de material adherente para asegurarse de que el modelo no se mueve durante las pruebas a altas velocidades. También se ha fabricado la quilla de la moto con un recorte de la misma plancha de ABS que se utilizó para la parte frontal.

Para pegar todas las piezas se ha utilizado un pegamento a base de cianoacrilato y bicarbonato sódico. La reacción de estos dos componentes produce un fraguado instantáneo, que sirve para fijar las piezas en la posición deseada de manera instantánea. Una vez que se han fijado las piezas, se utiliza resina epoxi para pegar las piezas y asegurar que estas aguantan grandes esfuerzos. Aunque sólo sea un modelo que no tenga que verse sometido a mucha carga, siempre esta bien asegurar su integridad completa, ya que si soltase alguna pieza se podría quedar atrancada en los filtros del túnel.



Figura 4.51: Pegado del carenado frontal y del colín

Cuando ya se han secado las piezas más grandes, se procede a pegar la quilla y los manillares, los cuales se habían retirado para facilitar el pegado de las piezas. Se une también el carenado frontal al chasis mediante un pieza de plástico para aumentar la resistencia de éste.



Figura 4.52: Conjunto completo ya pegado

Una vez que está todo seco y bien pegado, sabiendo que la resina epoxi que se utilizó tardaba 24 horas en alcanzar su resistencia máxima, se limpia la motocicleta y se pulen los restos de pegamento para poder pintarla. El modelo se pintara de negro mate con pintura en spray, esto se hace para evitar que el carenado refleje el laser del PIV en exceso, introduciendo ruido en las imágenes de la cámara.

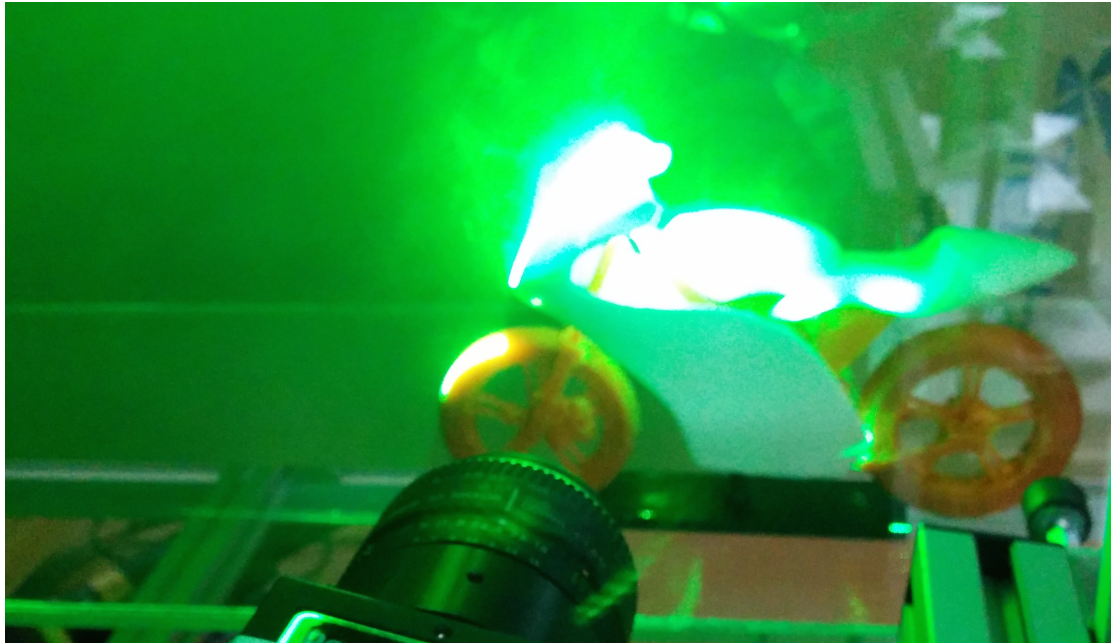


Figura 4.53: Modelo a escala en el túnel de viento bajo el laser del PIV

Una vez pintado y seco, el modelo a escala de la motocicleta de competición ya está listo para usarse en el túnel de viento.

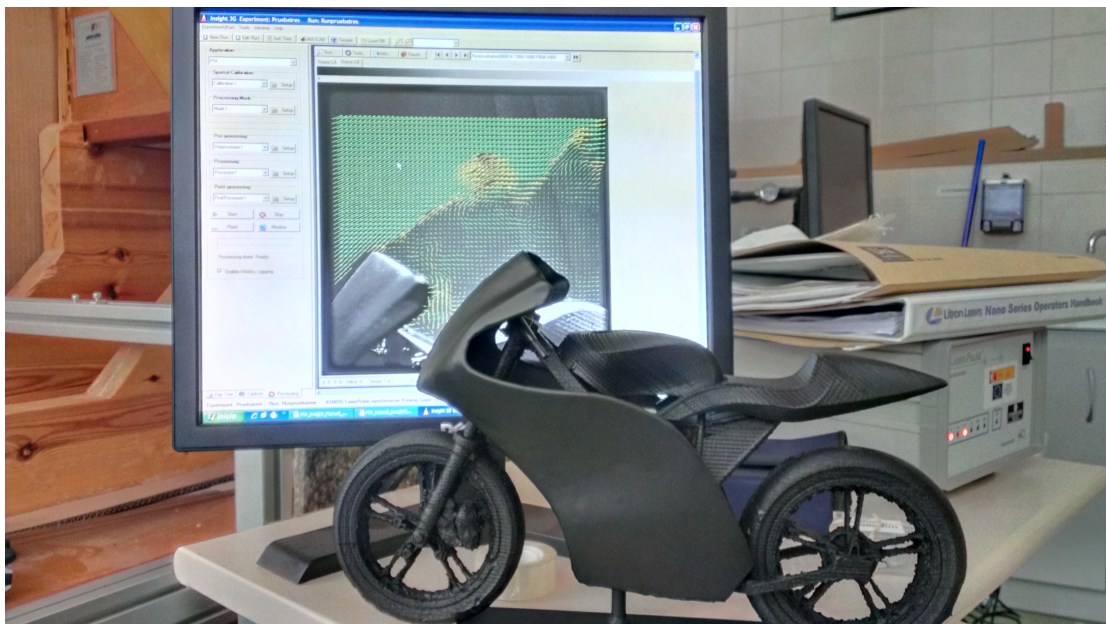


Figura 4.54: Modelo definitivo pintado de negro mate

5 Ensayos en el túnel de viento

5.1 El túnel de viento

Anteriormente se ha visto como se fabricó el modelo a escala de la motocicleta, ahora vamos a proceder a experimentar con este modelo dentro de un túnel de viento. Para ello contamos con el túnel de viento del Departamento de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Jaén.



Figura 5.1: Túnel de viento horizontal de la Universidad de Jaén
(www.fluidsujaen.es)

El túnel de viento horizontal (circuito cerrado), tiene una sección de 40 cm x 40 cm y 2 m de sección longitudinal para realizar experimentos. El flujo se genera con un ventilador de 5 kW, con una intensidad de turbulencia inferior al 2%, y se llega a conseguir una velocidad máxima del aire de 25 m/s. Con el fin de lograr una uniformidad del flujo de alto nivel, se dispone un sistema de rejillas intercambiables y panales honey combs situados en la entrada.

5.1.1 Cómo funciona un túnel de viento

El aire es soplado o aspirado a través de un conducto equipado con rejillas estabilizadoras al comienzo para garantizar que el flujo se comporte de manera laminar o con obstáculos u otros objetos si se desea que se comporte de forma turbulenta. Los modelos se montan en la zona de pruebas para su estudio, que brinda la información necesaria para calcular los coeficientes de sustentación y resistencia, necesarios para conocer si es factible o no emplear el modelo en la vida real. Los resultados prácticos deben ser comparados con los resultados teóricos, teniendo en cuenta el Número de Reynolds y el Número Mach, que constituyen los criterios de validación en las pruebas con modelos a escala.

Otras pruebas realizadas en los túneles de viento son:

1. Pueden unirse hebras a la superficie de estudio para detectar la dirección del flujo de aire y su velocidad relativa.
2. Pueden inyectarse tintes o humo en el flujo de aire para observar el movimiento de las partículas.
3. Pueden insertarse sondas en puntos específicos del flujo de aire para medir la presión estática y dinámica del aire.

5.1.2 Teoría de empleo de los túneles de viento

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. Cuando se proyecta cualquier tipo de avión surgen gran cantidad de problemas técnicos a resolver de forma experimental. Las aeronaves cada vez son más complejas, sus dimensiones también aumentan por lo que dificulta su experimentación a escala natural.

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 cuales por lo general están muy lejos de las condiciones reales. Los experimentos deben simular el fenómeno de tal forma, que después sea menos complejo al proceso de modelación el cual nos permitió obtener los resultados con buen grado de aproximación a las condiciones naturales. Para lograr un proceso de modelado y simulación óptimo respecto a las condiciones reales de trabajo del objeto, deben cumplirse las condiciones planteadas en la Teoría de las semejanzas.

Aunque hay muchos tipos de túneles aerodinámicos, en general pueden definirse como conductos que llevan en alguna parte de su trayectoria un ventilador accionado por un motor, que se encarga de que el aire fluya de manera constante. Usualmente las palas del ventilador son diseñadas según el tipo de túnel que se construirá, de manera similar a como se hacen las de los aviones. El túnel posee una entrada convergente y una salida divergente. La parte de más interés para la experimentación es la sección de prueba o garganta, que debe, generalmente, ser transparente, para permitir la observación e incluso la filmación; en ella se instala el modelo y diferentes elementos que permiten la medición de las fuerzas que experimenta este y las condiciones del aire que atraviesa esa sección. Resulta de interés que la sección de prueba sea la de menor área, ya que, debido a la ley de

conservación de la masa, genera una mayor velocidad cerca del modelo; ahorrando energía en el ventilador, ya que será capaz de generar el mismo efecto en la sección de prueba para potencias menores, además de que reduce las pérdidas por fricción en las paredes y codos del túnel.

5.1.3 Clasificación de los túneles de viento

Los túneles aerodinámicos se clasifican en función de varios aspectos los cuales son:

1. Por la circulación del aire en su interior

- **Abierto:** se toma el aire directamente de la atmósfera y después de hacerlo pasar por la cámara de ensayo se devuelve nuevamente a ella.
- **Cerrado:** el aire circula varias veces por la cámara, recuperando por medio de un difusor su energía fluida, antes de llegar de nuevo a la zona donde se encuentra instalado el difusor.

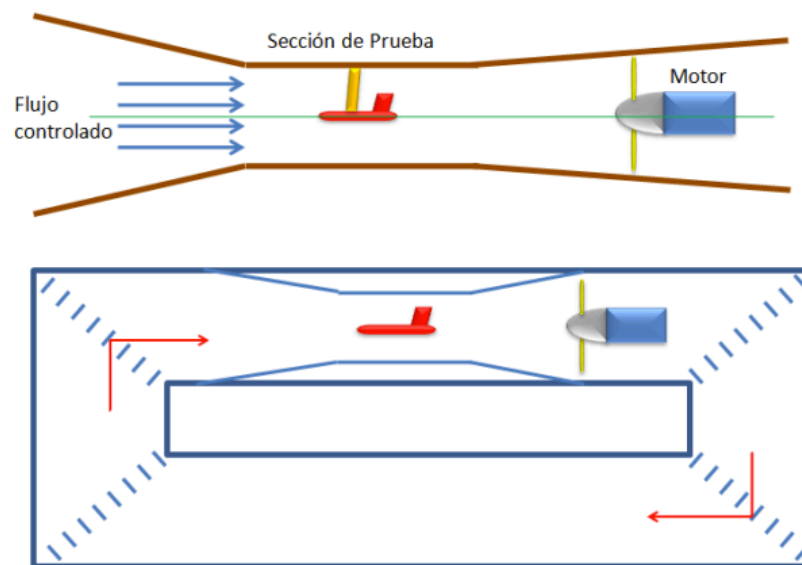


Figura 5.2: Túnel de viento abierto y cerrado (www.wikipedia.org)

2. Por la velocidad del flujo en su interior

- **Subsónico.**
- **Transónico.**
- **Supersónico.**
- **Hipersónico.**

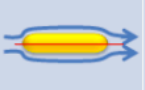
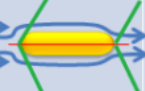
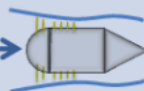
Régimen de Velocidad	Flujo Típico (Modelo)	Sección de Entrada	Radio de Compresión	Motor o sistemas de motor
Subsónico ($M = 0 - 0.7$)			1.0+	
Transónico ($M = 0.7 - 1.2$)			1.1	
Supersónico ($M = 1.2 - 5$)			2 ($M = 2$)	
Hipersónico ($M > 5$)			20 ($M = 5$)	

Figura 5.3: Tipos de túneles en función de la velocidad (www.wikipedia.org)

5.1.4 Composición general de los túneles de viento

- **Ventilador:** Produce la corriente de aire del circuito en el que se desarrolla la circulación de aire.
- **Cámara de ensayos:** En la que se sitúa el modelo experimental a probar. El tamaño de la cámara de ensayo es una de las características más importante de un túnel, ya que una de grandes dimensiones permite probar modelos sin gran reducción de escala con respecto al original, lo que permite mantener el índice de semejanza del número de Reynolds. Debido al desarrollo de la capa límite en la zona de pruebas, se debe tener en consideración el crecimiento del espesor de la capa límite, para evitar interferencias con las partes altas del modelo a escala que pueda perjudicar el patrón de flujo del vehículo, para esto se instalan plataformas especiales para que el modelo a escala no esté en contacto con el suelo de la zona de pruebas.
- **Direccionadores de flujo:** Los direccionadores de flujo son dispositivos que se instalan en los túneles de viento con la finalidad de distribuir el flujo uniformemente sobre la sección transversal de la zona de pruebas, evitando flujos en sentidos diferentes al de la velocidad de corriente libre.

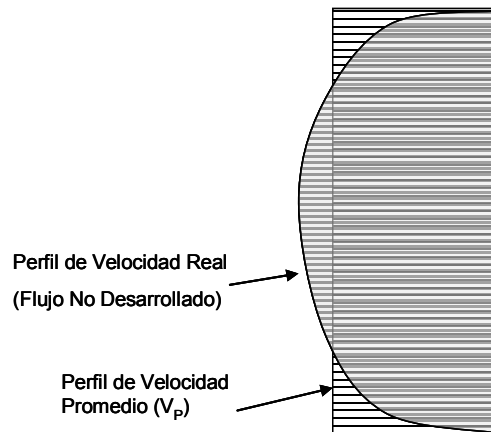


Figura 5.4: Perfil de velocidades real y promedio (Gerardo Javier Rojas Zevallos)

Los direccionadores pueden ser fabricados de diferentes formas, entre ellas tenemos la circular, la cuadrada o la hexagonal.

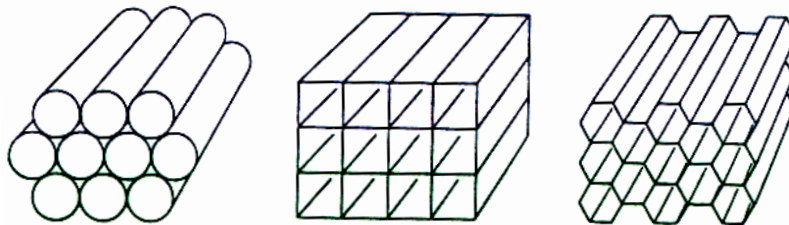


Figura 5.5: Tipos de direccionadores de flujo (A. Pope, 1978)

Se prefieren los direccionadores hexagonales (panales de abeja) debido a que no generan demasiadas pérdidas de presión; los direccionadores de forma cuadrada se prefieren, debido a su facilidad de construcción pero generan mayores pérdidas de presión que los direccionadores hexagonales. Los direccionadores de forma cilíndrica son los más fáciles de fabricar, pero generan más pérdidas que los direccionadores hexagonales y cuadrados.

Según Miranda Zuzunaga (1983), las pérdidas de presión en los direccionadores se debe a la fricción que sufre el flujo al atravesar las celdas. El coeficiente de pérdidas o factor de arrastre (C_x) se calcula de acuerdo a la ecuación de Prandtl para un régimen de número de Reynolds entre 10^5 y 10^7 .

$$C_x = \frac{0,074}{Re^{0,2}} \quad [5.1]$$

Utilizando el coeficiente de pérdidas (C_x), se calcula la fuerza de arrastre.

$$F_a = C_x * \frac{1}{2} * \rho * U^2 * s \quad [5.2]$$

donde “s”, es el área de la sección transversal de las celdas del direccionador, la caída de presión se calcula con

$$\Delta p = \frac{F}{S} \quad [5.3]$$

$$k = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} * \rho * U^2} \quad [5.4]$$

La desventaja de los direccionadores de flujo, es que generan perturbaciones y turbulencia en el flujo, para corregir estas condiciones es necesario tener una zona libre aguas abajo de los direccionadores para tranquilizar el flujo; otra forma es utilizando mallas o alisadores de flujo.

- **Alisadores de flujo:** El alisador de flujo, consiste en una malla colocada en la sección transversal del túnel de viento, cuyo propósito es destruir la turbulencia generada por los direccionadores de flujo y proporcionar a la zona de pruebas un flujo de aire con mínima turbulencia.

En los túneles de viento se emplean diferentes grados o niveles **mesh** (cantidad de espacios entre alambres en una pulgada lineal) de alisadores de flujo, comúnmente los túneles de viento, poseen de una a tres mallas dependiendo del grado de turbulencia.

El cálculo de pérdidas para las mallas o alisadores de flujo, se realiza mediante el cálculo del coeficiente de bloqueo (β).

$$\beta = \left(1 - \frac{d}{l}\right)^2 \quad [5.5]$$

Donde:

d: Diámetro del alambre.

l: Distancia entre alambres.

Con el coeficiente de bloqueo se puede estimar el coeficiente de pérdidas (k):

$$k = \frac{1 - \beta}{\beta^2} \quad [5.6]$$

Donde:

$$k = \frac{2 * \Delta p}{\rho * U^2}; \quad h = k * \frac{U^2}{2 * g} \text{ (m)} \quad [5.7]$$

- **Ventanillas anti-pompaje:** Ventanillas o rejillas que permiten el equilibrio de las presiones y evitan las oscilaciones críticas de las mismas.
- **Difusor:** Con el objetivo de reducir la velocidad expandiendo el fluido y recuperando la presión estática, el difusor está dividido en dos partes por el ventilador. Los difusores son muy sensibles a errores de diseño, pueden crear separación de la capa límite de manera intermitente o estable que es difícil de detectar y pueden crear vibraciones en el túnel, oscilación en el ventilador y variación en la velocidad de la sección de prueba. Hay que tener en cuenta que el aire que llega al difusor no es laminar, el aire que sale de la sección de prueba no es uniforme lo que hace cada vez más difícil el trabajo del difusor.
- **Cono de contracción:** Tiene la función de aumentar la velocidad del flujo. Los túneles aerodinámicos se pueden construir de diferentes materiales como por ejemplo: de chapas de acero, aluminio, fibrocemento, tejido metálico con mampostería, plástico reforzado etc. Sin embargo la construcción mixta de madera y acero se impuso finalmente, pues el mismo es fácil de trabajar y mantener.

5.1.5 Problemas y pérdidas en un túnel de viento

- **Problemas de interferencia (fenómeno de bloqueo):** El problema de interferencia en la sección de prueba debido al bloqueo del flujo por el modelo, es un problema que debe ser tratado con los ajustes necesarios y correcciones de los datos obtenidos. El bloqueo del flujo ocurre durante las pruebas con modelos relativamente grandes en la sección de túneles de tamaño limitado. Este bloqueo se define como el radio de la sección frontal del modelo al área de la sección de prueba. Se necesitan radios de bloqueo menores del 10% de la sección a pesar de que muchas veces esto se excede con creces. La presencia del modelo en la sección de prueba tiene como resultado que al bloquear el flujo aumenta la presión en las paredes del túnel. Por esta razón, los túneles de sección abierta se emplean a menudo. Las correcciones por bloqueo son todavía un factor activo de investigación.
- **Pérdidas primarias:** Son aquellas pérdidas de energía por fricción dentro de los conductos o tuberías. El cálculo de las pérdidas para flujos turbulentos, se realiza mediante el diagrama de Moody o mediante la fórmula de Colebrook.
- **Pérdidas secundarias:** Son aquellas pérdidas generadas por la disipación de energía debido a la presencia de accesorios en las tuberías o conductos, estos accesorios incluyen codos, tees, transiciones, etc.
- **Pérdidas en el modelo a escala:** Son aquellas pérdidas debido a la presencia de modelos u otros objetos en la zona de pruebas, cuyas fuerzas y momentos aerodinámicos, serán determinados experimentalmente en el túnel de viento.

5.1.6 Parámetros de las instalaciones de ensayo

Bloqueo de la cámara de ensayos.

$$\frac{L^2}{A} \quad [5.8]$$

Potencia requerida.

$$A * U^3 \quad [5.9]$$

Presión sobre las paredes de la cámara de ensayos.

$$\rho * U^2 \quad [5.10]$$

Donde:

- **L:** Longitud del modelo.
- **A:** Área de la sección transversal de la cámara de ensayos.
- **U:** Velocidad del flujo.

5.2 Calibración del túnel de viento

Para asegurar que se consiguen unos datos coherentes en los ensayos del túnel de viento, primero de todo hay que calibrar el mismo. Para ello utilizaremos el método de la anemometría de hilo caliente. El principio físico de funcionamiento de los anemómetros de hilo caliente está basado en la transferencia de calor por convección entre el hilo calentado y el flujo pasando a su alrededor. En estos sensores, una pequeña estructura es calentada y expuesta al flujo para medir el intercambio térmico que se produce. La relación entre la velocidad del flujo y la tensión de salida es deducida sobre la base de las ecuaciones de transferencia de calor, tomando por referencia la potencia generada por la corriente eléctrica que pasa por el hilo. El sensor es calentado por una corriente eléctrica I y enfriado proporcionalmente, de acuerdo a la componente de la velocidad del aire que incide perpendicular al elemento sensible.

5.2.1 Anemometría de hilo caliente.

Partes componentes

La sonda del anemómetro está constituida por un elemento sensor y por un soporte que está conformado por un conjunto de dientes. Los dientes, además de soportar el elemento sensor, conducen la corriente eléctrica hasta él. El elemento sensor tiene forma de filamento, por lo general de 5 μm de diámetro y 1,25 mm de longitud. El filamento o hilo puede estar constituido

por varios materiales, los más utilizados son el tungsteno, platino o aleaciones de platino.

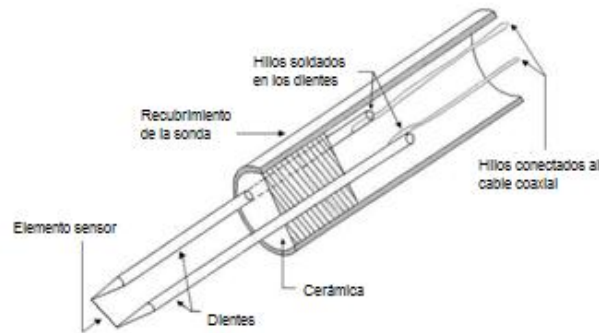


Figura 5.6: Esquema de una sonda (QUEIROZ, 2006)

Existe una gran variedad de anemómetros de CTA utilizados en diversas aplicaciones. Ellos se diferencian fundamentalmente por el número de elementos sensibles (número de hilos), por la posición de las agujas y por el tipo de material del hilo o el tipo de recubrimiento. Para la medición de la velocidad, el número de hilos generalmente corresponde a las componentes del vector velocidad que el sensor es capaz de medir.

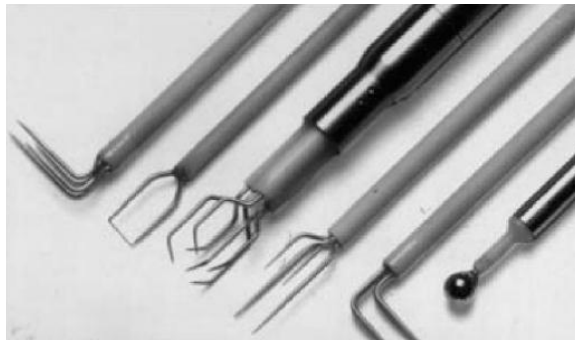


Figura 5.7: Tipos de sondas (Loureiro, 2006)

Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de los anemómetros a temperatura constante (CTA) está basado en que la corriente del sensor sufre variaciones de acuerdo con la velocidad del flujo, con el objetivo de mantener su resistencia a temperatura constante.

Estos anemómetros emplean un lazo de control que mantiene constante la diferencia de temperatura entre el elemento sobrecalentado y el flujo. La potencia que se consume para mantener el sensor sobrecalentado a una temperatura constante es proporcional a la velocidad del flujo de aire.

El instrumento es compuesto básicamente por un pequeño sensor y por un circuito controlador o de realimentación. Una corriente eléctrica controlada es impuesta a este filamento, y el calor generado por efecto Joule es expuesto al

flujo. El circuito eléctrico más utilizado para evaluar las variaciones de la resistencia eléctrica es el llamado puente de Wheatstone, compuesto por cuatro resistencias eléctricas en forma de un cuadrilátero, siendo dos fijas, una de referencia y la otra es la resistencia del elemento sensor (R_w).

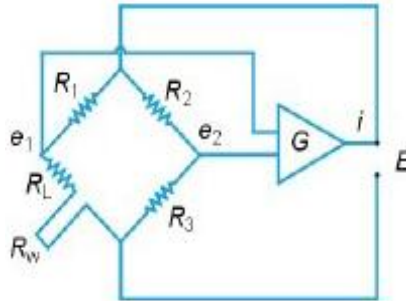


Figura 5.8: Configuración circuital básica del CTA (Jorgensen, 2002)

El puente de Wheatstone opera con una resistencia de sobrecalentamiento constante, cuyo valor es calculado por el propio puente. El circuito de retroalimentación es el responsable de producir la corriente necesaria para balancear el puente de Wheatstone a través de un aumento de la resistencia del sensor. Esto ocurre debido a que el filamento (hilo) posee un coeficiente térmico positivo de resistividad, lo que significa que cuando la temperatura del filamento varía lo mismo ocurre con el valor de su resistencia. En condiciones de operación, el circuito de retroalimentación aplica una corriente eléctrica al puente de Wheatstone, y promueve así el aumento de la temperatura y de la resistencia del hilo caliente hasta un valor predeterminado, que por lo general es en torno a 250°C. En esa condición de equilibrio se dice que el puente está balanceado. Un pequeño aumento de la velocidad del fluido provoca el enfriamiento del sensor, disminuyendo su resistencia y consecuentemente desbalanceando el puente de Wheatstone. Eso hace que el circuito de retroalimentación aumente la corriente que alimenta al puente, calentando el sensor para llevar nuevamente el puente a la condición de equilibrio. Como la respuesta del circuito es muy rápida la temperatura del sensor permanece virtualmente constante durante la variación de la velocidad del flujo. Luego, la diferencia de tensión entre los extremos del puente es proporcional a la velocidad medida.

El desplazamiento del flujo al incidir sobre el filamento de la sonda, altera su resistencia eléctrica, que como se había mencionado anteriormente esta resistencia es uno de las componentes del puente de Wheatstone. La diferencia de tensión de salida del puente es amplificada “K” veces, siendo este valor proporcional a la velocidad del flujo. El valor amplificado realimenta el puente de Wheatstone a través del amplificador de corriente “I” (servo amplificador), corrigiendo la temperatura del sensor por la variación de su corriente eléctrica con el objetivo de mantener constante el resto de los elementos del puente de Wheatstone. Para permitir el valor de la manipulación digital de la velocidad del flujo, la señal que representa la variación de las tensiones de la corriente es convertida y almacenada en una

computadora a través de un dispositivo de adquisición de datos (convertidor A/D: analógico a digital). Con los valores de la tensión de corriente digitalizados se obtiene una curva de calibración del anemómetro que relaciona la tensión de corriente (E) con la velocidad del flujo (U). Finalmente a partir de la serie temporal obtenida que muestra los valores de la velocidad en función del tiempo, se realiza el análisis de los datos donde se obtienen las características estadísticas de la señal, así como sus espectros.

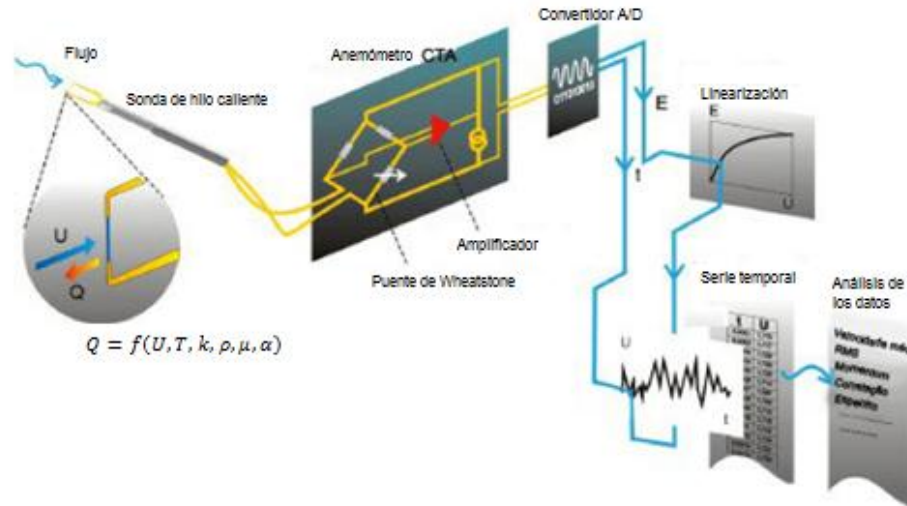


Figura 5.9: Toma de datos de un anemómetro de hilo caliente (Dantec Dynamics, 2012)

Adquisición y tratamiento de datos

La adquisición de la tensión de salida del anemómetro de hilo caliente es un paso determinante en la medición y muy importante para el futuro tratamiento de los datos. La tensión de salida es una señal continua y analógica. Para poder trabajar con la señal digital es necesario realizar inicialmente el muestreo, es decir, adquirir una serie temporal de los valores de la señal original a través de una placa de conversión de analógico a digital (A/D). Los parámetros que definen la adquisición de datos de una placa A/D son: a) tasa de muestreo, “ f_a ”, determina intervalo de tiempo en el cuál las muestras consecutivas de la señal analógica serán adquiridas; b) número de muestras, “ N_a ”, determina el número de puntos de la serie temporal. Estos dos parámetros determinan el tiempo de adquisición, “ t_a ”, necesario para digitalizar la serie temporal. La relación entre estos parámetros está dada por la ecuación 1:

$$\Delta t_a = \frac{N_a}{f_a} \quad [5.11]$$

El convertidor análogo-digital discretiza la señal en pequeños intervalos. El número de intervalos es definido por el número de bits de la placa de adquisición. Otro elemento importante en la preparación de la señal digital de salida son los filtros. Los filtros son utilizados para eliminar los ruidos o

analizar determinados rangos de frecuencias que sean de interés. Los diferentes tipos de filtros son: pasa bajos, pasa altas, pasa banda y supresor de banda.

Luego de obtener los datos de la señal de salida es necesario realizar el proceso de calibración y determinar de la forma más precisa posible, la relación entre la tensión de salida del anemómetro y las propiedades físicas de interés, en este caso la velocidad y la temperatura.

Para obtener los datos de velocidad, a partir de la correcta curva de calibración, es necesario: 1) realizar la corrección por temperatura, 2) obtener la curva de calibración entre la tensión de salida y la velocidad del flujo, 3) descomposición del vector velocidad en componentes.

Corrección por temperatura

Al variar la temperatura del momento de calibración al momento de la medición, Bearman citado por Jørgensen, propone la siguiente expresión para realizar la corrección a la tensión de salida por temperatura:

$$E_{\text{corr}} = E * \left(\frac{T_w - T_0}{T_w - T_a} \right)^{0,5} \quad [5.12]$$

Donde:

- **T_w** : temperatura del sensor de hilo caliente sensor.
- **T₀**: temperatura ambiente de referencia en relación con el último recalentamiento antes de la calibración.
- **T_a**: temperatura ambiente durante la adquisición.

Calibración

Para establecer las leyes de calibración es necesario conocer cuál es el comportamiento de transferencia de calor entre el sensor y el flujo a su alrededor. Según Loureiro este comportamiento está determinado por la siguiente ecuación:

$$I^2 * R_F = h * l * \pi * d * (T_f - T_a) \quad [5.13]$$

Donde:

- **I**: corriente eléctrica que pasa por el sensor.
- **h**: coeficiente de transferencia eléctrica por convección.
- **d**: diámetro del hilo.
- **l**: longitud del hilo.
- **T_f**: temperatura del hilo caliente.
- **T_a**: temperatura ambiente durante la adquisición.

- R_F : resistencia del hilo

Esta ecuación muestra que la potencia eléctrica disipada en el hilo es función del coeficiente de transferencia de calor por convección y de la diferencia de temperatura entre el hilo y el fluido.

Conociendo la ecuación anterior es necesario determinar la relación entre la tensión en el hilo y la velocidad del flujo. Según Loureiro existen una gran variedad de leyes de calibración, pero la más conocida y de mayor aplicación es la Ley de King (1914) que se muestra a través de la función exponencial de la ecuación:

$$E^2 = A + B * U^n \quad [5.14]$$

Donde E es la tensión de salida del anemómetro, U es la velocidad del flujo y las constantes A y B deben ser determinadas a través de un procedimiento de calibración. King recomendó el uso de $n = 0,45$.

Según Jørgensen, la expresión anterior también puede ser escrita como una función polinomial, donde el valor de tensión de salida que debe ser utilizado es el corregido por la variación de temperatura, es decir, es el " E_{corr} ".

$$U = C_0 + C_1 * E_{corr} + C_2 * E_{corr}^2 + C_3 * E_{corr}^3 + C_4 * E_{corr}^4 + C_5 * E_{corr}^5 \quad [5.15]$$

La curva de calibración que se obtendría sería como la mostrada en la siguiente figura.

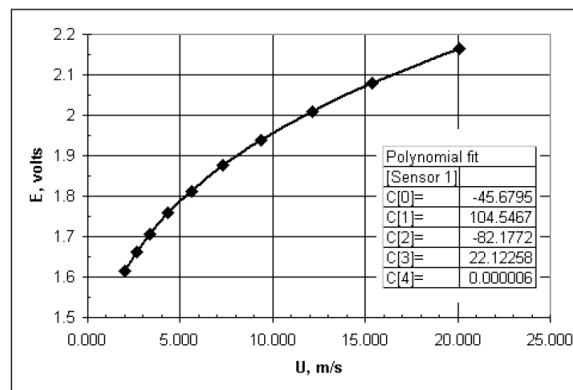


Figura 5.10: Curva de calibración de tensión con respecto a la velocidad (Jorgensen, 2002)

Medición de la velocidad

Una gran ventaja de la anemometría por hilo caliente es permitir la discriminación de las componentes de la velocidad. La obtención del vector velocidad se alcanza a través de dos pasos fundamentales: a) descomposición del vector velocidad en una componente normal, una tangencial y otra componente transversal (binormal) al sensor de hilo

caliente, y b) análisis de la sensibilidad de hilo caliente para cada una de esas componentes.

Para entender como un hilo caliente cilíndrico puede distinguir las componentes de la velocidad, se analiza primeramente un flujo bidimensional, con el vector velocidad U en el plano de las agujas xy . El vector U se descompone en una componente normal, U_N , al hilo caliente y en una componente tangencial o paralela al hilo, U_T . Sin embargo, aunque ambas inciden simultáneamente sobre el sensor, la principal responsable por el enfriamiento del hilo es la componente normal U_N . Bajo estas condiciones, el ángulo formado entre el vector velocidad y la normal al sensor (dirección x) en el plano de las agujas es el llamado ángulo de “guiñada”.

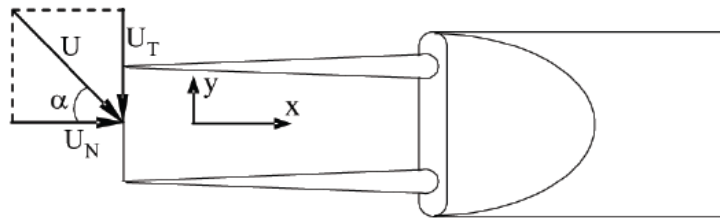


Figura 5.11: Ángulo alpha de guiñada (Loureiro, 2006)

El sensor de hilo caliente también es sensible a las variaciones de la velocidad en la dirección normal al plano de las agujas xy . Este aspecto es considerado a través del llamado ángulo de ataque, que es definido como el ángulo entre el vector velocidad en el plano xz y la dirección x .

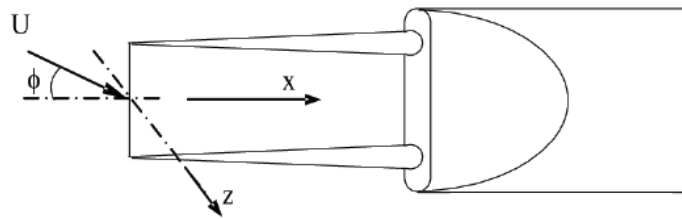


Figura 5.12: Ángulo phi de ataque (Loureiro, 2006)

Por tanto, la velocidad efectiva vista por el sensor tendrá las contribuciones de las tres componentes de la velocidad, esto es expresado a partir de la ecuación.

$$V_e^2 = (U_N^2 + k^2 * U_T^2 + h^2 * U_B^2) \quad [5.16]$$

Donde V_e es la velocidad efectiva, U_B es la componente binormal de la velocidad en la dirección z , U_N componente normal y U_T componente tangencial. Los parámetros k y h son conocidos como coeficientes de “guiñada” y de ataque, y representan la sensibilidad del sensor con respecto a esos ángulos.

5.2.2 Calibración de la sonda.

Como hemos visto anteriormente, para poder utilizar la sonda en la anemometría de hilo caliente, antes debemos obtener una curva de calibración de la sonda para poder obtener datos coherentes de la velocidad que circula por el túnel.

En el Departamento de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Jaén, se cuenta con un ordenador conectado a un sistema de adquisición de datos IFA 300, con las siguientes características.

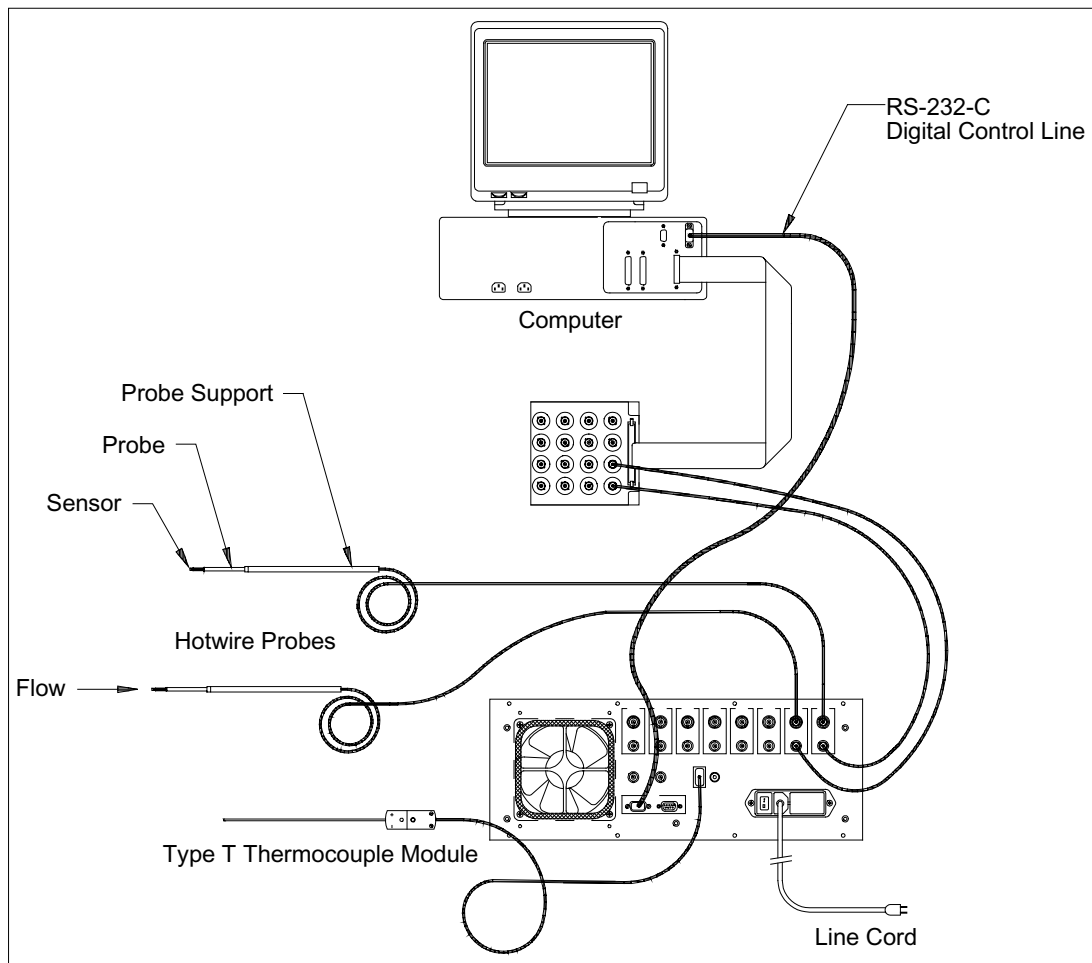


Figura 5.13: Vista general del sistema IFA 300 (IFA 300 Manual)

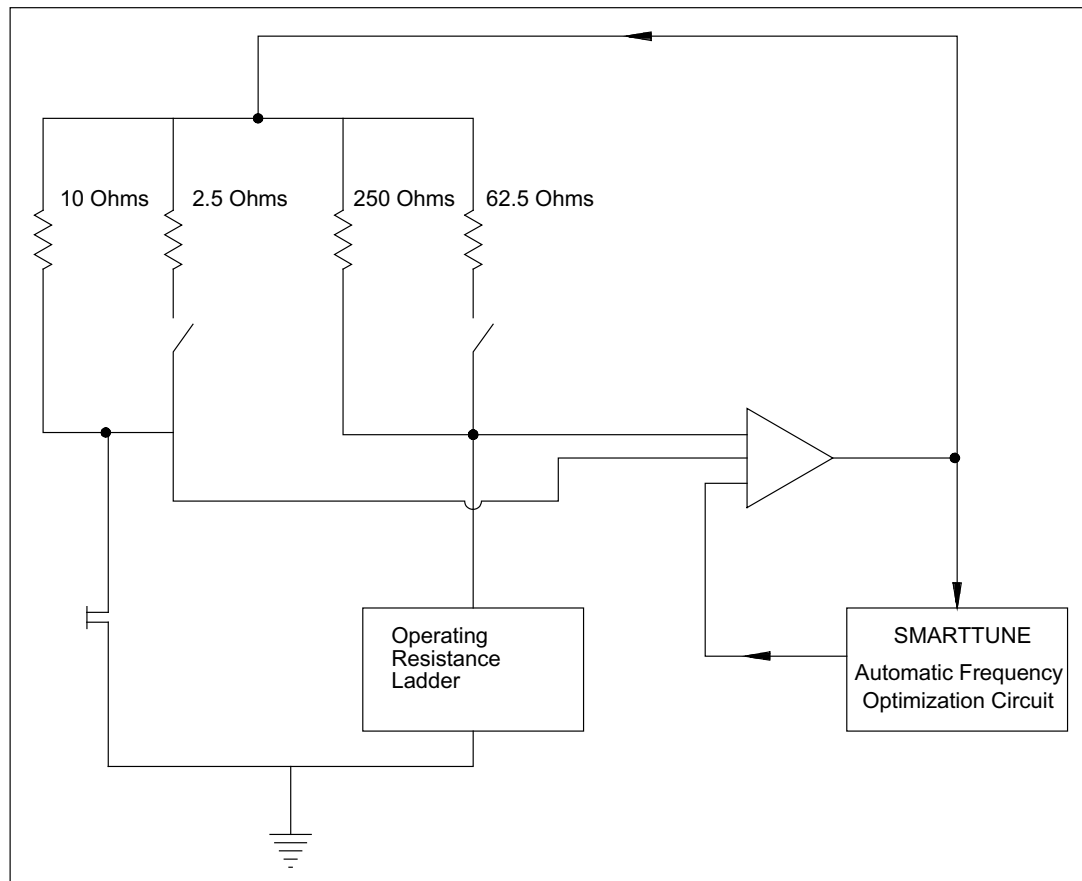


Figura 5.14: Circuito del puente de temperatura constante (IFA 300 Manual)

The signal conditioners in the IFA 300 provide settings for filtering and increasing the bridge voltage gain to use the entire $\pm 5V$ signal range. High-pass filters available are .1 Hz, 1 Hz, and 10 Hz. These filters are used when only velocity fluctuation measurements are needed since mean voltage information and thus actual velocity is removed from the signal. Offset settings available are 0 to 10 V in 10 mV steps. Offset and gain can be used to utilize entire $\pm 5V$ signal range. Offset must be used when actual bridge voltage is greater than 5 volts. Gains available are 1 to 1000. Low-pass filters allow the removal of high frequency signals which are out of the range of interest and to eliminate aliasing. Thirteen low-pass filter settings are available from 10 Hz to 1 MHz.

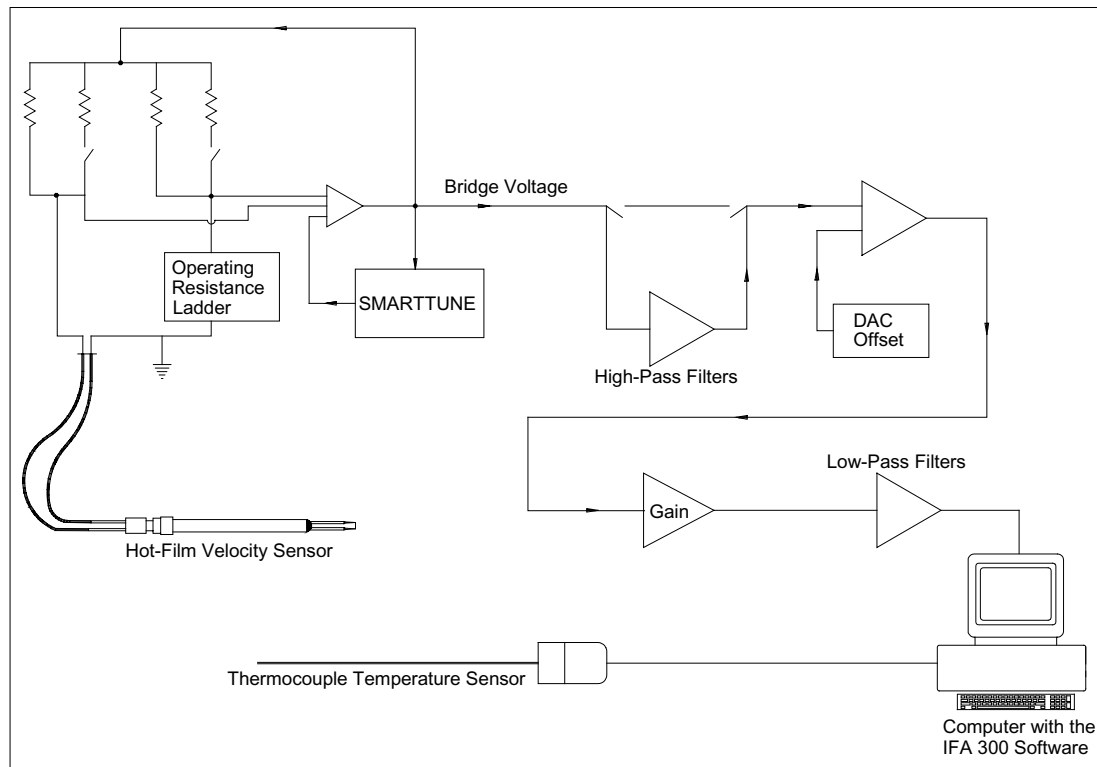


Figura 5.15: Vista general del funcionamiento del sistema IFA 300 (IFA 300 Manual)

Primero de todo introducimos la sonda en un sistema con un flujo de aire de referencia, del cual conocemos perfectamente sus características. Después de eso usamos el software que viene con el sistema IFA 300 para llevar a cabo la calibración de la sonda. Para ello Abrimos el programa y seleccionamos la opción “Calibration” del menú principal y luego “Probe data”. Nos saldrá una pantalla como la siguiente.

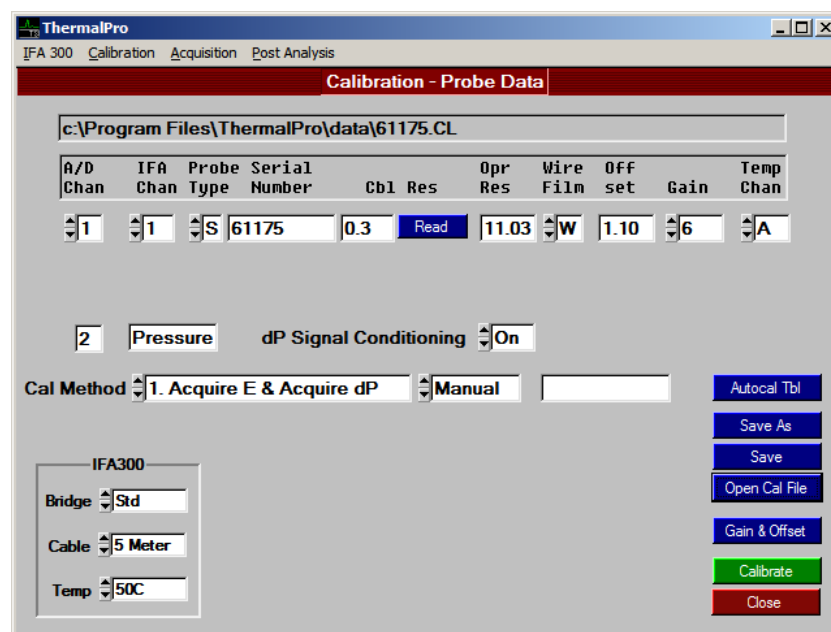


Figura 5.16: Pantalla de calibration-probe data (IFA 300 Manual)

Seleccionamos el método de cálculo, “Acquire E and Type Velocity” en nuestro caso, seleccionamos la opción “Calibrate” y nos aparecerá la siguiente pantalla.

Figura 5.17: Pantalla de calibración (IFA 300 Manual)

Rellenamos los diferentes campos con las características de nuestro experimento, entre las más importantes encontramos las siguientes.

Presión atmosférica (mm Hg)	763 (tomada en el laboratorio)
Temperatura ambiente (°C)	24 (tomada en el laboratorio)
Temperatura de operación (°C)	250
Velocidad mínima (m/s)	1,21
Velocidad máxima (m/s)	49
Método de calibración	“Acquire E and Type Velocity”
Unidades de la dP	mm Hg
Puntos	17

Tabla 5.1: Datos para la calibración

Una vez hecho esto, situamos la sonda en el flujo de calibración y lo ponemos a cero. Ahora se harán 17 mediciones con una velocidad del flujo que irá desde 0 a 50 m/s, por cada cambio de velocidad, se introduce la velocidad actual del flujo y se pulsa la tecla “Adquire”. Cuando terminemos, haremos clic en “Next Screen” para obtener nuestra tabla de calibración, que será parecida a la siguiente.

Probe Serial #: 61175

Cal Point	Bridge Voltage	Bridge Voltage	Bridge Voltage	dP	Actual Velocity	Temp
1	0.7105			0.0000	0.00	20.00
2	0.8945			0.0120	1.65	20.00
3	0.9126			0.0181	2.02	20.00
4	0.9369			0.0295	2.59	20.00
5	0.9604			0.0464	3.24	20.00
6	0.9861			0.0735	4.08	20.00
7	1.0128			0.1158	5.12	20.00
8	1.0420			0.1824	6.43	20.00
9	1.0739			0.2901	8.10	20.00
10	1.1079			0.4618	10.22	20.00
11	1.1438			0.7297	12.85	20.00
12	1.1825			1.1502	16.13	20.00
13	1.2270			1.8779	20.62	20.00

Cal Pt: 0 El Volts: 0.0000 dP: 0.0000 Act Vel: 0.0000

Figura 5.18: Tabla de calibración (IFA 300 manual)

Con este archivo de calibración será con el que trabajaremos para obtener las medidas de velocidad en el túnel de viento, si seleccionamos la opción “Curves”, podremos ver una gráfica de cómo varía el voltaje en función de la velocidad y del error en la medida. En la siguiente foto se puede ver la gráfica que se obtuvo para nuestro caso.

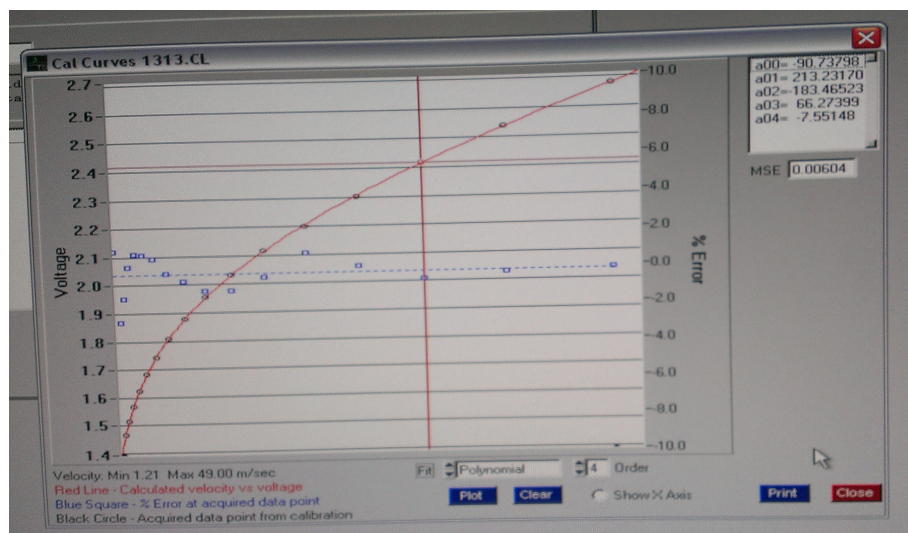


Figura 5.19: Curva de calibración

5.2.3 Calibración del túnel de viento.

Una vez la sonda está calibrada, está lista para ser usada en el túnel de viento, para ello llevamos el equipo IFA 300 junto al túnel e introducimos la sonda en la zona de pruebas mediante un portasondas.

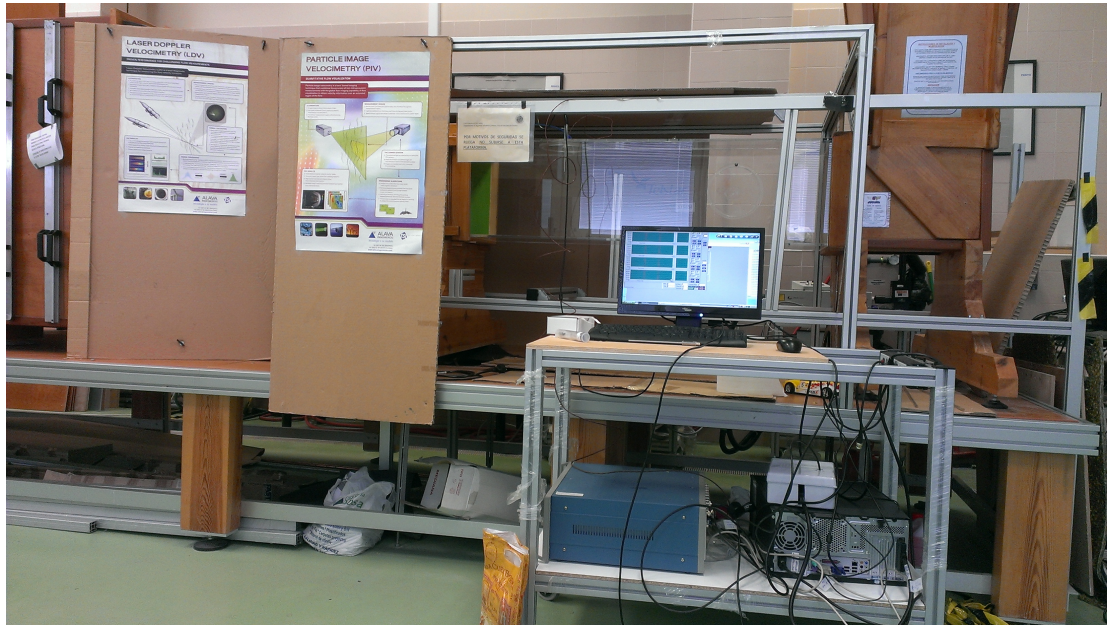


Figura 5.20: Equipo IFA 300 junto al túnel de viento con la sonda en la zona de pruebas

El objetivo es averiguar la curva de velocidades del túnel de viento, ya que éste sólo ofrece información sobre la frecuencia de giro del ventilador. Para ello introducimos la sonda en la zona de pruebas e iremos probando las distintas frecuencias de giro del ventilador, desde 4 Hz hasta 50 Hz, midiendo en intervalos de 2 Hz la velocidad dentro de la zona de pruebas.

Para llevar a cabo la medición usaremos el software que viene con el sistema IFA 300 (ThermalPro) como ya hicimos antes. Para ello seleccionamos la opción “Acquisition” del menú principal y luego seleccionamos “Probe Table”. Una vez hecho esto, cargamos el archivo de calibración de la sonda que hicimos en el apartado anterior con “Add Prove”.

Acquisition - Probe Table

Experiment Name: C:\PROGRAM FILES\THERMALPRO\DATA\EXAMPLEA.RXXX

A/D Ch	IFA Ch	Probe Type	Serial Number	Cbl Res	Opr Res	Off set	Wire Film	Temp Gain	Probe Number
*1	1	S	61175	0.30	11.03	1.10	W	6	A

Sensor Setup

IFA Channel: 1 Tag A/D Ch Serial #: 61175

Cable Resistance: 0.30 Read Cable S Single

Probe Resistance: Read Probe

Opr Resistance: 11.03

Offset: 1.10 6 Gain

Cable: 5 Meter Std Bridge

Temperature Probe: A

Experiment

Get File

Rename

Next Screen

Close

Curves Add Probe Clear Probe Edit Line Save Line

Figura 5.21: Adquisición de datos – tabla de sonda (IFA 300 manual)

Ahora pasamos a la pantalla siguiente, en la que podremos cambiar el nombre de los archivos que guardaremos, que en nuestro caso serán las tablas de tensión y velocidad.

Acquisition - Conditions Setup

Experiment Name: C:\PROGRAM FILES\THERMALPRO\DATA\EXAMPLEA.RXXX

Experiment

Name: EXAMPLEA.Rxxx

Next File: 1 Rename

Conditions Setup

Atm Pressure: 760.00 mm Hg

Velocity Units: m/s

Temp Units: C

Comment

Position

X: 0.00 Y: 0.00 Z: 0.00 Inches

Acquisition Control

Mode: Graphics

Low Pass: Auto

Sample Rate

Actual: 2000

Rate: 2000 Hz

Size: 1 Kpts/ch

Time: 0.5120 Sec

Test Trig: Internal Single

Next Screen

Close

Figura 5.22: Adquisición de datos – pantalla de condiciones (IFA 300 manual)

El apartado más importante de esta pantalla es la frecuencia de testeo, ya que esta controla cuantas medidas hará la sonda por segundo y durante cuanto tiempo. Nosotros utilizaremos los siguientes datos:

Rate (hz)	1000
Size (Kpts/ch)	64
Time (s)	65,5360

Tabla 5.2: Frecuencia de testeo

Cuando rellenemos esta pantalla, encendemos el túnel de viento y cambiamos la frecuencia del ventilador a 4 Hz. Hecho esto pasamos a la siguiente pantalla y pulsamos la opción “Trigger”, la cual dará comienzo a las mediciones de la sonda.

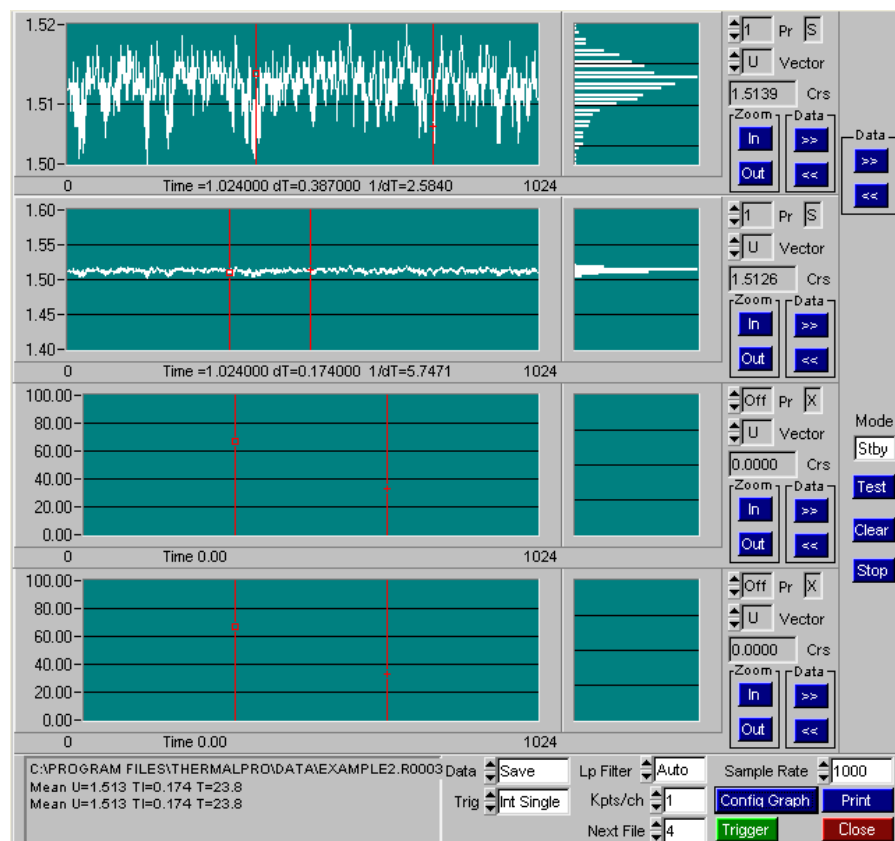


Figura 5.23: Pantalla de medición en tiempo real (IFA 300 manual)

Una vez que han pasado los 65 segundos de la prueba que hemos programado antes, debería de aparecernos una gráfica como la que se ve en la imagen anterior. Ahora pulsamos la opción “Print” y generamos dos matrices de datos, una de tiempo y velocidad y otra de tiempo y voltaje. Como hemos programado la sonda para que tome 1000 datos por segundo de la velocidad del aire dentro del túnel y el voltaje en la sonda, y la prueba dura 65,536 segundos, obtendremos dos matrices con 65536 datos de velocidad y voltaje para una frecuencia del ventilador.

4HZ.W0001	
62.0970000	2.08391619
62.0980000	2.08391619
62.0990000	2.08391619
62.1000000	2.08391619
62.1010000	2.08391619
62.1020000	2.08391619
62.1030000	2.08391619
62.1040000	2.08391619
62.1050000	2.08391619
62.1060000	2.07942414
62.1070000	2.08391619
62.1080000	2.08391619
62.1090000	2.08391619
62.1100000	2.08391619
62.1110000	2.08391619
62.1120000	2.08391619
62.1130000	2.08391619
62.1140000	2.08391619
62.1150000	2.08391619
62.1160000	2.08391619
62.1170000	2.08391619
62.1180000	2.08391619
62.1190000	2.08391619
62.1200000	2.08391619
62.1210000	2.08391619
62.1220000	2.08391619
62.1230000	2.08391619
62.1240000	2.08391619
62.1250000	2.08391619
62.1260000	2.08391619

Figura 5.24: Datos de la velocidad y el tiempo para una frecuencia de 4 Hz

Se repetirá el proceso anteriormente visto para todas las frecuencias restantes y se guardan las distintas matrices obtenidas. Las matrices de voltaje se obtienen únicamente par ver que no se supera el intervalo de tensión máximo que alcanza nuestra sonda, que es de -5 a 5 Voltios.

Una vez obtenidos todos los datos de velocidad y comprobando que no se supera el límite de voltaje de la sonda, introducimos las matrices de datos en MATLAB y generamos una gráfica con la media de las velocidades para cada frecuencia y la desviación típica de los datos obtenidos por la sonda.

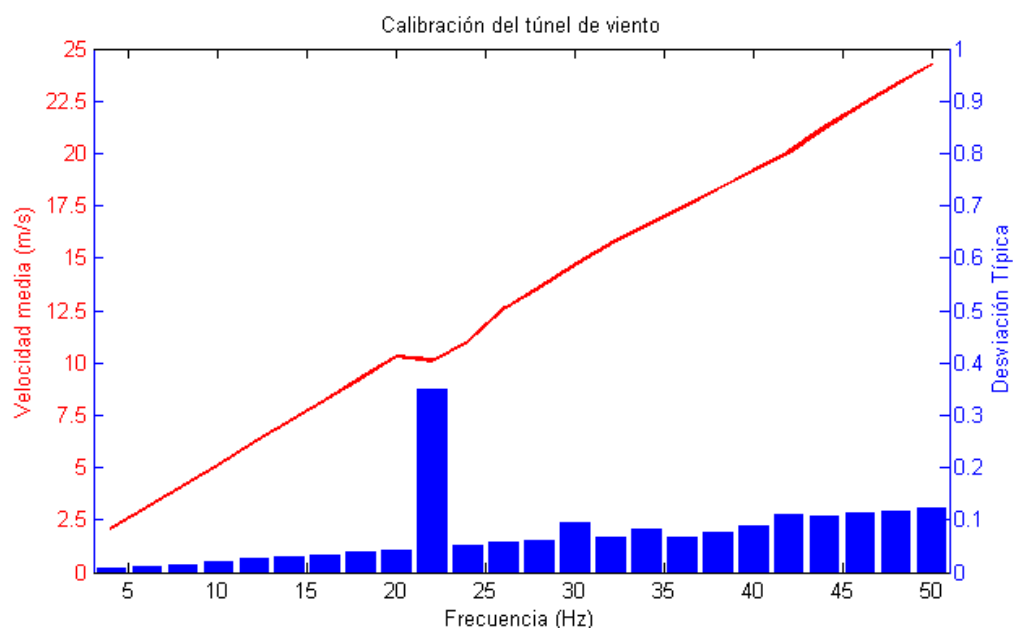


Figura 5.25: Curva de velocidades del túnel de viento

Como podemos ver, el túnel de viento alcanza una velocidad máxima de 25 m/s y la desviación típica de los datos aumenta conforme aumenta la velocidad. Hay que mencionar que a los 22 Hz hay un aumento brusco de la desviación típica y la velocidad, que seguía una tendencia de aumento casi lineal, sufre una bajada brusca. Esto se debe a que esa frecuencia debe de acercarse a alguno de los modos de vibración naturales de la estructura del túnel, esto hizo que durante la toma de datos, el túnel vibrase con una amplitud mayor incluso que a la máxima velocidad de giro del ventilador. Esta vibración hace que la sonda y el propio túnel se muevan, dando datos erróneos, de ahí el aumento brusco de la desviación típica, también produce una velocidad menor en la zona de pruebas de la que se esperaría.

6 Conclusiones

La primera parte del proyecto se ha dedicado a la construcción del modelo a escala de la motocicleta de 250 cc diseñada en la Universidad de Jaén para el proyecto Motostudent, parándose a describir los distintos medios de fabricación utilizados, a parte de la calibración y puesta a punto del túnel de viento. En la siguiente parte del proyecto (Parte II), se llevará a cabo la simulación por ordenador del modelo, el análisis mediante el PIV y se sacarán resultados del drag y otros aspectos aerodinámicos de la motocicleta.

6.1 Fabricación

Para este proyecto se han visto diversos métodos de fabricación:

- El mecanizado se programó mediante el software CATIA, este programa tiene un módulo muy versátil de mecanizado, aunque no es el mejor del mercado, no obstante tiene muchas opciones de configuración. Se ha visto que un bajo solape de la herramienta mejora mucho el acabado, pero aumenta el tiempo de mecanizado. En la industria se utilizan fresadoras CNC con mucha más velocidad de giro y potencia que la que nosotros usamos, esto hace que puedan hacer desbastados muy rápidos con un gran solape y luego refinarlos con operaciones de acabado. En la actualidad las fresadoras de 5 o más ejes son capaces de reproducir complicadas geometrías, diseñadas por ordenador mediante archivos CAD. Esta tecnología se puede comparar con la impresión 3D, sólo que el coste de la maquinaria, el tiempo de trabajo y el gran desperdicio de material hacen que este proceso sea muy caro, no como en las nuevas tecnologías de prototipado rápido, que buscan ser cada vez más precisas y asequibles. Hay que decir a favor del mecanizado, que con este proceso se obtienen calidades superficiales mucho mejores que la mayoría de tecnologías de prototipado rápido y lo que es más importante, las piezas obtenidas tienen unas características mecánicas excepcionales.
- El termoconformado es un proceso de fabricación relativamente sencillo y que da muy buenos resultados, para los moldes que se fabricaron se obtuvieron piezas de gran calidad. El principal problema de este proceso radica en la fabricación de los moldes, que suele ser lo más costoso, aunque estos luego se pueden utilizar para fabricar gran cantidad de piezas, el bajo coste de este proceso lo convierte en una buena opción para cadenas pequeñas o para la producción en masa. En cuanto a la fabricación de prototipos, todo depende del grado de complicación de los moldes, ya que hacer un molde muy complicado para un prototipo tiene un gran gasto económico y más si

vamos a ir cambiando el diseño del prototipo a lo largo del desarrollo, de todas, es un proceso a tener muy en cuenta en este campo, más ahora con el auge de la impresión 3D que pueden reducir el coste de los moldes.

- La impresión 3D es el método más potente para prototipado que hemos podido usar, con únicamente una geometría diseñada en el ordenador hemos podido fabricar un modelo con bastante exactitud, completamente funcional y en muy poco tiempo. Esta es una tecnología joven, por lo que tiene amplio grado de mejora, en un futuro se debería de convertir en una herramienta clave para procesos de prototipado o para la construcción de geometrías muy complejas. Por otra parte, el abaratamiento de la tecnología y la iniciativa RepRap, están haciendo que el prototipado llegue a los hogares de todas las personas, este hecho puede hacer que al final todos tengamos una impresora 3D en nuestra casa, como tenemos un ordenador o un horno. La libertad de creación que ofrece este método es lo que lo hace tan atractivo, la posibilidad de descargar diseños de Internet y poder imprimir cualquier objeto de la vida cotidiana o pieza que necesitemos.

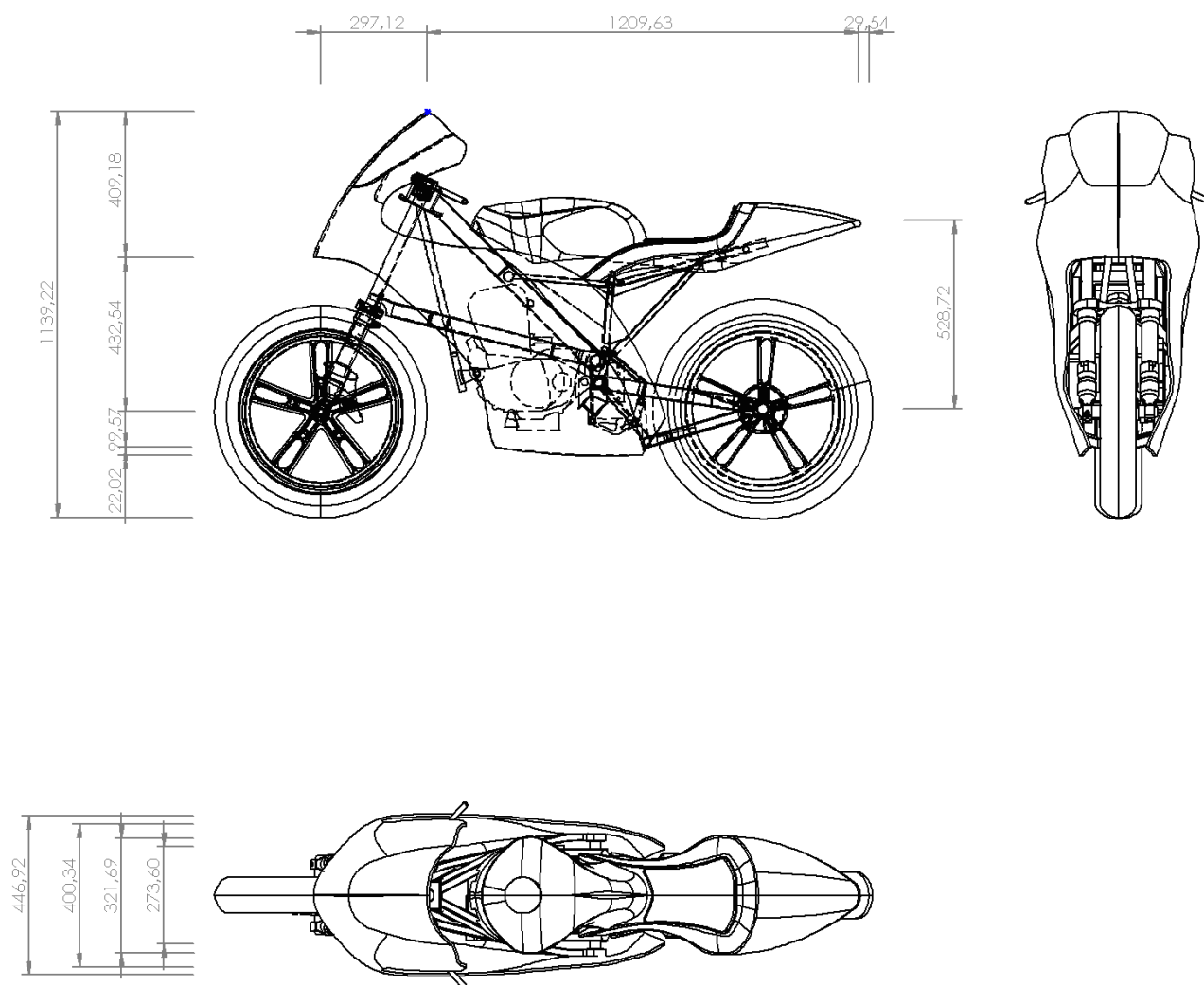
6.2 Túnel de viento

Se ha introducido el modelo a escala en el túnel de viento para ver el campo de velocidades alrededor del modelo y la estela que este produce mediante el método del PIV. Los ensayos de modelos a escala en el túnel de viento siempre cuentan con los problemas de las semejanzas geométricas, y estos se agravan cuanto más reducida es la escala, es complicado conseguir valores reales cuantitativos en el modelo real si se utilizan ensayos de este tipo. Las simulaciones de fluidos por ordenador (CFD), actualmente son una mejor opción que los análisis de modelos a escala reducida en un túnel de viento, bien es cierto que un análisis con un modelo a escala real en un túnel ofrece muy buenos resultados, pero esto se hace imposible para objetos grandes, ya que se necesitarían túneles de viento enormes. El principal problema de las simulaciones radica en la cantidad de capacidad de cálculo que requieren, sin embargo la capacidad de cálculo de los ordenadores crece cada año, haciendo que se necesiten cada vez equipos menores para hacer simulaciones. En un futuro puede ser que las simulaciones sustituyan por completo a los túneles de viento, aunque en la actualidad éstos siguen teniendo su sitio en el campo de la experimentación.

7 Anexos

7.1 Planos

En este apartado se presentarán los planos que se han obtenido a partir de la geometría en 3D que se generó por ordenador mediante SolidWorks. Dado que contienen geometrías muy complejas y su acotación completa sería prácticamente imposible, se dan algunas cotas generales, para una mayor precisión en la medida se deberán utilizar los archivos de geometría 3D utilizados en el proyecto.



Autores:

Carlos García Baena y José Ángel Moya Muriana

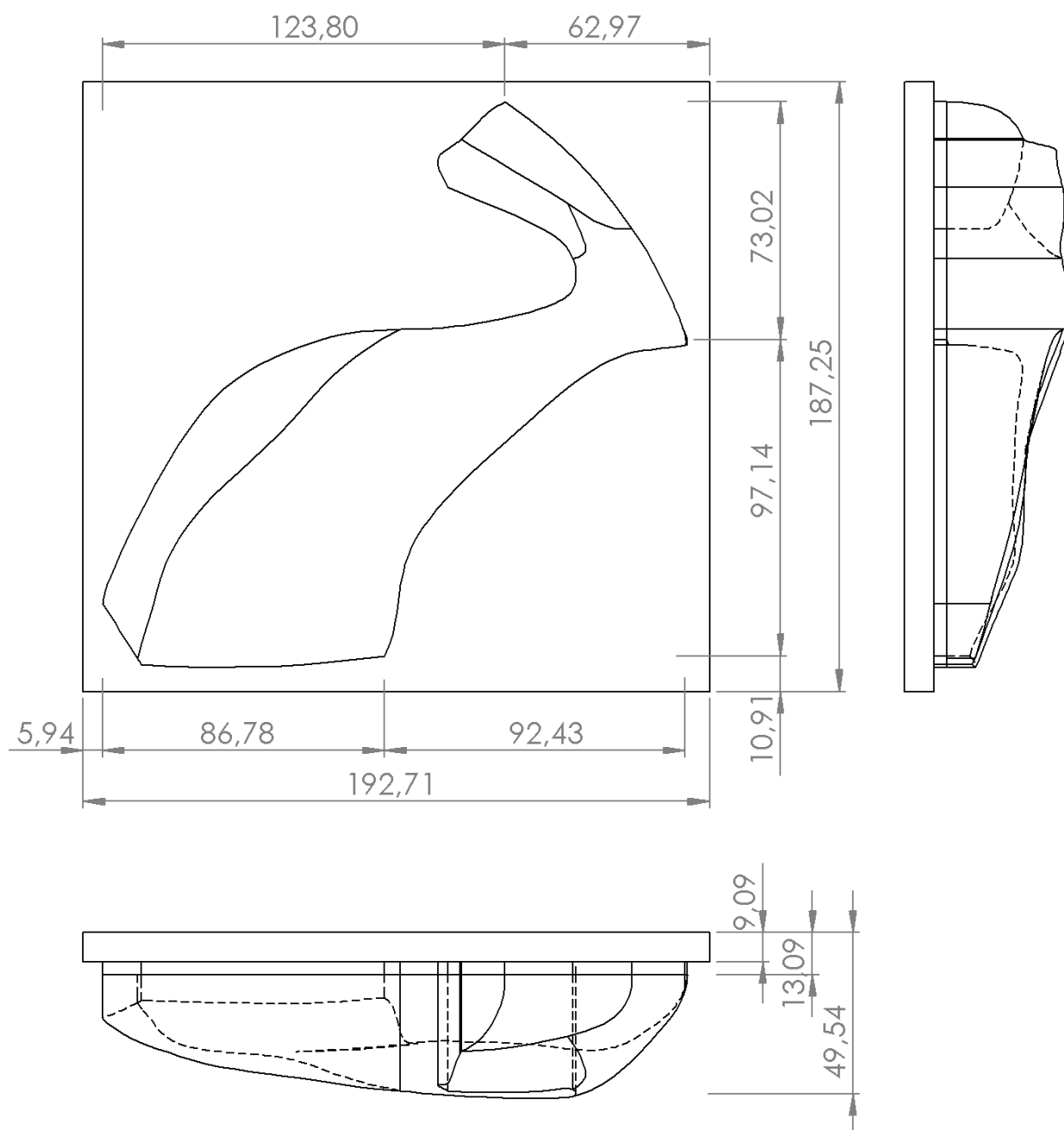
Plano:

Motocicleta EPSUJATeam 250 cc

Escala:

1:20

Fecha:



Autores:

Carlos García Baena y José Ángel Moya Muriana

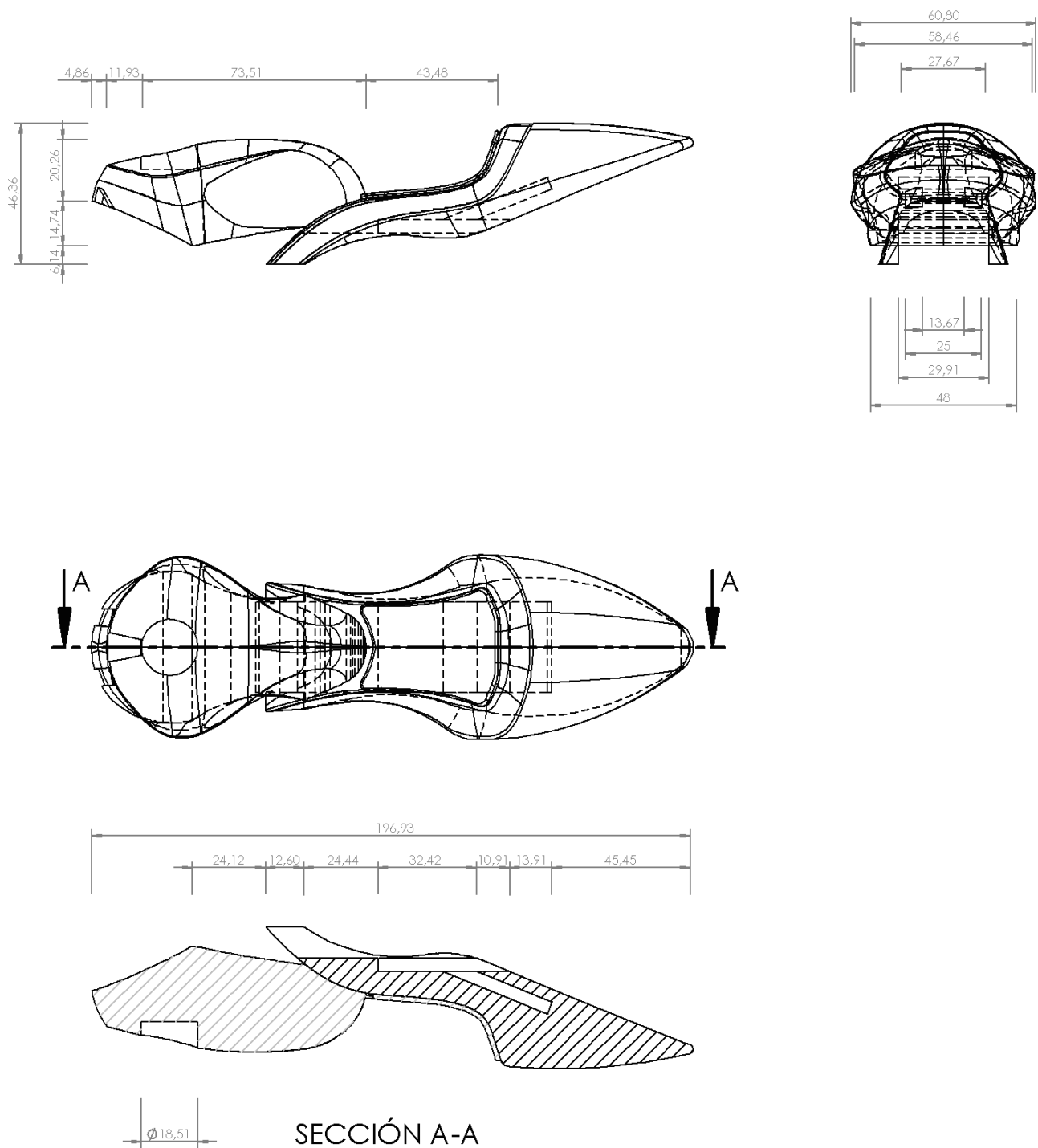
Plano:

Molde

Escala:

1:2

Fecha:



Autores:

Carlos García Baena y José Ángel Moya Muriana

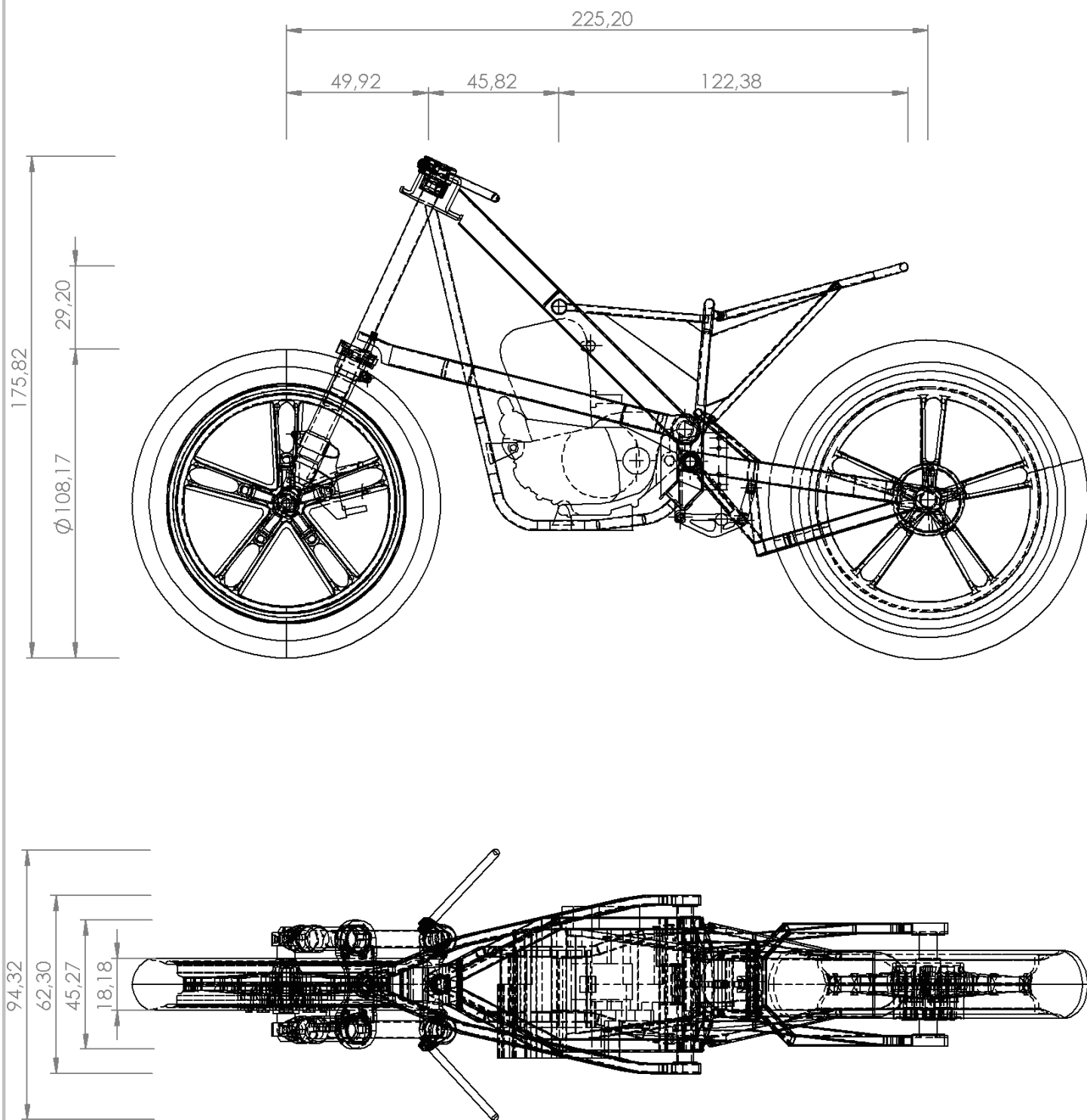
Plano:

Carenado del depósito y el colín del modelo a escala

Escala:

1:2

Fecha:



Autores:

Carlos García Baena y José Ángel Moya Muriana

Plano:

Motocicleta a escala

Escala:

1:2

Fecha:

8 Bibliografía

- Motorcycle handling and chasis desing, the art and science (Tony Foales)
- www.wikipedia.org
- Manual hilo caliente PCE009 (PCE Group)
- Estudio y optimización del flujo alrededor del colín de una moto de competición (Santiago Díaz)
- Utilización de anemómetro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de velocidad de aire en un túnel de viento (Revista Rielac, Vol XXXV)
- Constant temperature anemometer system, operation manual (TSI)
- Thermoforming center 911, manual (HME technology)
- 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)
- www.TSI.com
- <http://help.solidworks.com/2012/>
- Sistemas de prototipado rápido, José Antonio Alonso Rodríguez.
- www.serina.es
- Estudio numérico de los fenómenos de contacto en el mecanizado. Rachid Cheriguene.
- www.alasewm.com.ar
- IFA 300 manual