



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Medida de fuerzas en túnel aerodinámico sobre perfiles fabricados mediante impresora 3D

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Autor: Daniel Bautista Salinas
Director: Antonio Viedma Robles

Cartagena, Septiembre de 2015



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Índice

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Introducción y antecedentes.....	16
1.2 Objetivos	16
1.3 Fases del proyecto y recursos disponibles	17
Capítulo 2. Instalaciones experimentales y equipos	19
2.1 Túnel aerodinámico.....	20
2.1.1 Tipo y características generales del túnel aerodinámico. Funcionamiento.....	20
2.1.2 Características de los principales elementos del túnel aerodinámico.....	21
2.2 Instrumentación	25
2.2.1 Instrumentación para la caracterización del flujo.....	25
2.2.1.1 Manómetro inclinado de columna de líquido.....	25
2.2.1.2 Tubo de Pitot.....	26
2.2.2 Instrumentación para medida de fuerzas aerodinámicas	27
2.2.3 Instrumentación para medida de las condiciones ambientales	31
Capítulo 3. Pruebas y ajuste de los equipos	33
3.1 Introducción	34
3.2 Ensayos de evaluación del flujo en la cámara de ensayos	34
3.2.1 Ensayo uniformidad del perfil de velocidades medias.....	34
3.2.2 Ensayo para la determinación de las distintas velocidades del túnel aerodinámico.....	36
3.3 Medida del arrastre y la sustentación mediante balanza aerodinámica	43
3.3.1 Primera prueba de calibración de la balanza aerodinámica	44
3.3.2 Segunda prueba de calibración de la balanza aerodinámica	49
3.3.3 Tercera prueba de calibración de la balanza aerodinámica	51

3.4 Incertidumbre en las medidas.....	57
3.4.1 Introducción	57
3.4.2 Error experimental. Definición de términos	57
3.4.3 Expresión de la incertidumbre de medida	58
3.4.4 Procedimiento general para el cálculo de la incertidumbre en las medidas	58
3.4.5 Cálculo de la propagación de la incertidumbre de las medidas en el resultado	59
3.4.5.1 Incertidumbre en las medidas de velocidad	60
3.4.5.2 Incertidumbre en las medias de fuerzas aerodinámicas y coeficientes de sustentación y arrastre.....	62
Capítulo 4. Impresoras 3D	65
4.1 Introducción	66
4.2 Tecnologías empleadas por las impresoras 3D	66
4.2.1 Tecnología Fused Deposition Modeled - FDM	67
4.2.1.1 Impresora 3D modelo Dimension bst 1200es.....	68
4.2.1.2 Impresora 3D modelo Fortus 400mc	68
4.2.2 Tecnología Objet PolyJet	68
4.2.2.1 Objet Desktop	69
4.3 Comparativa de las distintas tecnologías 3D	69
Capítulo 5. Perfiles aerodinámicos	71
5.1 Introducción	72
5.2 Características de los perfiles aerodinámicos	72
5.3 Fuerzas aerodinámicas	74
5.3.1 Fuerzas en perfiles aerodinámicos.....	76
5.3.2 Evaluación de las prestaciones de perfiles aerodinámicos	78
5.4 Clasificación de los distintos perfiles aerodinámicos	80
5.4.1 Perfiles NACA	80

5.4.2 NACA 0012	81
Capítulo 6. Diseño y fabricación de los perfiles aerodinámicos	85
6.1 Introducción	86
6.2 Selección de las dimensiones del perfil aerodinámico	87
6.3 Diseño 3-D del perfil aerodinámico.....	89
6.3.1 Perfil en una pieza	89
6.3.2 Perfil en dos piezas.....	91
6.4 Fabricación del perfil aerodinámico.....	94
6.4.1 Presupuestos.....	94
6.4.2 Posición	95
6.4.3 Elección de los perfiles a fabricar.....	95
6.4.3 Montaje	96
6.5 Rugosidad	99
6.5.1 Introducción	99
6.4.2 Características de la rugosidad	101
6.5.3 Influencia de la rugosidad sobre los perfiles aerodinámicos.....	102
6.5.4 Tipos de medición de la rugosidad.....	104
6.5.5 Medida de la rugosidad.....	105
6.5.6 Medidas.....	107
6.5.7 Conclusiones	109
Capítulo 7. Resultados y conclusiones	111
7.1 Introducción	112
7.2 Medida de fuerzas aerodinámicas	112
7.2.1 Fuerzas aerodinámicas.....	114
7.2.2 Coeficientes adimensionales.....	116

7.3 Comparación de los resultados de los dos perfiles.....	119
7.4 Comparación de resultados con datos de referencia	121
7.5 Conclusiones.....	126
Bibliografía y Referencias	129
Anexos	131
Anexo I. Coordenadas NACA 0012	132
Anexo II. Características de las impresoras 3D empleadas.....	135
Anexo III. Datos de los ensayos de medida de fuerzas aerodinámicas.....	138
Anexo IV. Datos de referencia de fuerzas aerodinámicas	147

Índice de figuras

Figura 2.1 Representación general del túnel de viento

Figura 2.2 Representación de la campana de entrada

Figura 2.3 Representación de la rejilla y del Honeycomb

Figura 2.4 Sección de ensayos

Figura 2.5 Manómetro inclinado

Figura 2.6 Tubo de Pitot

Figura 2.7 Distribución de las galgas extensiométricas en la balanza aerodinámica

Figura 2.8 Esquema de la balanza aerodinámica

Figura 2.9 Esquema puentes de Wheastone

Figura 2.10 Balanza aerodinámica

Figura 2.11 Esquema de las dimensiones de la balanza

Figura 2.12 Estación meteorológica

Figura 3.1 Montaje para la determinación de la uniformidad del perfil de velocidades media y para la medida de velocidades

Figura 3.2 Conexión del tubo de Pitot al multimanómetro

Figura 3.3 Comprobación de la influencia del perfil en la uniformidad y en la velocidad del flujo

Figura 3.4 Comparación ensayo en el que aumentamos las frecuencia y en el que la disminuimos

Figura 3.5 Comparación de los ensayos de variación de la velocidad con la frecuencia a distintas distancias y con presencia del perfil con las condiciones ambientales iniciales

Figura 3.6 Comparación de los ensayos de variación de la velocidad con la frecuencia a distintas distancias y con presencia del perfil con las condiciones ambientales finales

Figura 3.7 Comparación de la variación de la velocidad con la frecuencia a 350 mm con distintas condiciones ambientales

Figura 3.8 Comparación de la variación de la velocidad con la frecuencia a 520 mm con distintas condiciones ambientales

- Figura 3.9 Comparación de la variación de la velocidad con la frecuencia a 520 mm y con presencia de perfil con distintas condiciones ambientales
- Figura 3.10 Comparación de dos pruebas de la variación de la velocidad con la frecuencia a distancia de 520 mm realizadas con un mes y medio de diferencia
- Figura 3.11 Ensayo de variación de la velocidad con la frecuencia utilizado en las pruebas de medida de fuerzas aerodinámicas
- Figura 3.12 Ensayo para determinar el centro de masas del perfil
- Figura 3.13 Montaje inicial para el ensayo de sustentación
- Figura 3.14 Montaje final para el ensayo de sustentación
- Figura 3.15 Ensayo sustentación 1
- Figura 3.16 Ensayo sustentación 1 frente al ensayo de referencia
- Figura 3.17 Ensayo sustentación 1 ajustado frente al ensayo de referencia
- Figura 3.18 Montaje para el ensayo de arrastre
- Figura 3.19 Ensayo arrastre 1
- Figura 3.20 Ensayo arrastre 1 frente al ensayo de referencia
- Figura 3.21 Ensayo arrastre 1 ajustado frente al ensayo de referencia
- Figura 3.22 Pesas colocada a 0.33c
- Figura 3.23 Ensayo sustentación 2
- Figura 3.24 Ensayo sustentación 2 frente al ensayo de referencia
- Figura 3.25 Ensayo sustentación 2 ajustado frente al ensayo de referencia
- Figura 3.26 Ensayo sustentación 1 ajustado frente al ensayo sustentación 2 ajustado
- Figura 3.27 Máquinas de pesaje
- Figura 3.28 Ensayo sustentación 3
- Figura 3.29 Ensayo sustentación 3 frente al ensayo de referencia
- Figura 3.30 Ensayo sustentación 3 frente a la bisectriz
- Figura 3.31 Ensayo arrastre 2
- Figura 3.32 Ensayo arrastre 2 frente al ensayo de referencia
- Figura 3.33 Ensayo arrastre 2 frente a la bisectriz

Figura 4.1 Esquema sistema de inyección

Figura 5.1 Resultante de las fuerzas aerodinámicas sobre un perfil

Figura 5.2 Partes de un perfil aerodinámico

Figura 5.3 Momentos y fuerzas aerodinámicas

Figura 5.4 Desarrollo del flujo en un perfil aerodinámico

Figura 5.5 Circulación alrededor de un perfil

Figura 5.6 Representación del sistema del vórtice de un perfil aerodinámico

Figura 5.7 Tipos de arrastre para un perfil aerodinámico

Figura 5.8 Perfil NACA 0012

Figura 5.9 Variación del coeficiente de sustentación con el ángulo de ataque de un perfil NACA 0012 a diferentes rugosidades superficiales

Figura 5.10 Variación del coeficiente de arrastre con coeficiente de sustentación de un perfil NACA 0012 a diferentes rugosidades superficiales

Figura 6.1 Perfil de madera

Figura 6.2 Perfil de madera "tufts"

Figura 6.3 Secciones que se ajustan a las dimensiones de nuestro perfil

Figura 6.4 Croquis varilla perfil 1

Figura 6.5 Croquis varilla perfil 2

Figura 6.6 Presupuesto ABS Plus

Figura 6.7 Presupuesto PolyJet

Figura 6.8 Broca soldad a una varilla para limpiar el agujero del perfil en dos pieza

Figura 6.9 Alambre en forma de gancho para limpiar el agujero del perfil en una pieza

Figura 6.10 Soldadura metálica en frío y resultado de aplicación en el perfil

Figura 6.11 Papel lija

Figura 6.12 Fractura producida en la manipulación del perfil

Figura 6.13 Resultado final de una de las varillas de los perfiles

Figura 6.14 Orificio final tapado con la soldadura metálica en frío

Figura 6.15 Perfil fabricado en el SAIT en dos piezas

Figura 6.16 Perfil fabricado en STRATASYS en una pieza

Figura 6.17 Representación esquemática de la vista microscópica de la superficie

Figura 6.18 Superficie ideal. Perfil ideal. Superficie real

Figura 6.19 Perfil real

Figura 6.20 Representación del Reynolds frente al C_L

Figura 6.21 Influencia de la rugosidad superficial en el coeficiente de sustentación en diferentes localizaciones de la cuerda

Figura 6.22 Variación del coeficiente de sustentación con el ángulo de ataque de un perfil NACA 0012 a diferentes rugosidades superficiales

Figura 6.23 Representación de la rugosidad media aritmética

Figura 6.24 Equipo de medida de rugosidad

Figura 6.25 Esquema de la medida del parámetro Ra en la cara 1 del perfil 1

Figura 7.1 Esquema de las fuerzas medidas en la balanza

Figura 7.2 Sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 1

Figura 7.3 Sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 2

Figura 7.4 Arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 1

Figura 7.5 Arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 2

Figura 7.6 Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 1

Figura 7.7 Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 2

Figura 7.8 Coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 1

Figura 7.9 Coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 2

Figura 7.10 Curva polar en el perfil 1

Figura 7.11 Curva polar en el perfil 2

Figura 7.12 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque de los dos perfiles

Figura 7.13 Comparación del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque de los dos perfiles

Figura 7.14 Comparación de la curva polar de los dos perfiles

Figura 7.15 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 1 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Figura 7.16 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 2 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Figura 7.17 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 1 con los datos de MAHEL MOHAMMED (2008)

Figura 7.18 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 2 con los datos de MAHEL MOHAMMED (2008)

Figura 7.19 Comparación del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 1 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Figura 7.20 Comparación del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 2 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Figura 7.21 Comparación de la curva polar en el perfil 1 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Figura 7.22 Comparación de la curva polar en el perfil 2 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Figura II.1 Características del material empleado por la Dimension bst 1200es

Figura II.2 Características del material empleado por la Fortus 400mc

Figura II.3 Características del material empleado por la Objet Desktop

Figura V.1 Plano perfil NACA 0012

Figura V.2 Plano ensamblaje de las partes 1 y 2 del perfil NACA 0012

Figura V.3 Plano parte 1 perfil NACA 0012

Figura V.4 Plano parte 2 perfil NACA 0012

Índice de tablas

Tabla 2.1 Características principales del túnel de viento

Tabla 2.2 Características técnicas principales de la balanza

Tabla 3.1 Condiciones ambientales y velocidades del ensayo aumentando la frecuencia

Tabla 3.2 Condiciones ambientales y velocidades del ensayo disminuyendo la frecuencia

Tabla 3.3 Datos ensayos con las condiciones ambientales iniciales

Tabla 3.4 Datos ensayos con las condiciones ambientales finales

Tabla 3.5 Ensayo de sustentación de referencia

Tabla 3.6 Ensayo de arrastre de referencia

Tabla 3.7 Resultados del primer ensayo de la sustentación

Tabla 3.8 Resultados del primer ensayo del arrastre

Tabla 3.9 Resultados del segundo ensayo de la sustentación

Tabla 3.10 Pesadas del juego de pesas en Newtons

Tabla 3.11 Pesadas del juego de pesas en kilogramos

Tabla 3.12 Resultados del tercer ensayo de la sustentación

Tabla 3.13 Resultados del segundo ensayo del arrastre

Tabla 3.14 Medidas de incertidumbre

Tabla 4.1 Materiales disponibles para la tecnología FDM

Tabla 4.2 Ventajas e inconvenientes de la tecnología FDM

Tabla 4.3 Materiales disponibles para la tecnología Objet PolyJet

Tabla 4.4 Ventajas e inconvenientes de la tecnología Objet PolyJet

Tabla 4.5 Comparativa de las tecnologías de impresión 3D

Tabla 6.1 Medida de Ra sobre la cara 1 del perfil 1

Tabla 6.2 Medida de Ra sobre la cara 2 del perfil 1

Tabla 6.3 Medida de Ra sobre la cara 1 del perfil 2

Tabla 6.4 Medida de Ra sobre la cara 2 del perfil 2

Tabla I.1 Coordenadas del NACA 0012

Tabla I.2 Coordenadas del NACA 0012 fabricado en milímetros

Tabla III.1 Ensayo con el perfil 1 y frecuencia de 20 Hz

Tabla III.2 Ensayo con el perfil 1 y frecuencia de 30 Hz

Tabla III.3 Ensayo con el perfil 1 y frecuencia de 40 Hz

Tabla III.4 Ensayo con el perfil 2 y frecuencia de 20 Hz

Tabla III.5 Ensayo con el perfil 2 y frecuencia de 30 Hz

Tabla III.6 Ensayo con el perfil 2 y frecuencia de 40 Hz

Tabla IV.1 Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque obtenido de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Tabla IV.2 Coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque obtenido de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Tabla IV.3 Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque obtenido de MAHEL MOHAMMED (2008)

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción y antecedentes

1.2 Objetivos

1.3 Fases del proyecto y recursos disponibles

1.1 Introducción y antecedentes

Los túneles aerodinámicos, son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la generación de una corriente fluida de propiedades conocidas para la medida de acciones del viento sobre obstáculos de muy diversa naturaleza y más generalmente, el estudio de los fenómenos físicos en los que el aire en movimiento juega un papel dominante.

El Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena posee en la actualidad un túnel aerodinámico que fue desarrollado, construido e instrumentado durante los cursos académicos 2000-2001 y 2001-2002. Todo el proceso fue documentado mediante el PFC "Diseño, construcción y puesta a punto de un túnel aerodinámico subsónico en aspiración" (LEGAZ-GARCÍA, B., 2002). Posteriormente se evaluaron las prestaciones del mismo, y la información recogida se expuso en el PFC "Evaluación de un túnel aerodinámico mediante anemometría de sensor térmico y puesta a punto de los equipos de medida de fuerzas aerodinámicas y visualización de flujos" (SERRANO-ROCHEL, A. & PÉREZ-GARCÍA, J., 2003).

El túnel de viento mencionado es trasladado de ubicación. Por lo que, tras la nueva puesta en marcha, se requiere de la comprobación de que las características de funcionamiento del mismo no han sido alteradas durante el cambio de localización.

Por lo que inicialmente el proyecto surge por la necesidad de la nueva puesta en marcha del túnel aerodinámico.

En las instalaciones solo disponemos de un perfil NACA 0012 fabricado en madera de modo artesanal y muy deteriorado. Volver a fabricar perfiles para futuros ensayos mediante esta técnica es demasiado costoso en tiempo, por lo que es aquí donde se propone la utilización de las impresoras 3D para la obtención de nuevos perfiles aerodinámicos. Y mediante una balanza aerodinámica, disponible y que previamente calibramos, mediremos las fuerzas de sustentación y arrastre en los perfiles. Compararemos los datos obtenidos con datos de referencia y sacaremos conclusiones sobre la calidad de los perfiles fabricados mediante esta tecnología.

1.2 Objetivos

El objeto del Trabajo Final de Grado es, tras la comprobación de que el traslado de localización del túnel aerodinámico no ha afectado en las prestaciones del mismo, el estudio de perfiles aerodinámicos fabricados con tecnología de impresión 3D. Estudio llevado a cabo mediante la medida de las fuerzas de sustentación y arrastre en los mismos utilizando una balanza aerodinámica previamente calibrada.

- Comprobar el correcto funcionamiento tras el traslado. Tras el traslado del túnel aerodinámico este ha podido sufrir daños. Para evaluarlos se medirá el perfil de velocidades medias, mediante Pitot, en distintas secciones de la zona de ensayos del

túnel. Se medirá, manteniendo un régimen de giro del ventilador constante, transversal y longitudinalmente en distintos puntos de cada sección.

- Puesta a punto de la balanza aerodinámica. Para lo que se realizará su calibración, tanto para la medida del arrastre como para la sustentación con un montaje de perfiles de estantería y roldanas. Además se llevarán a cabo medidas en perfiles aerodinámicos NACA 0012 de ambas fuerzas para diferentes ángulos de ataque y números de Reynolds, con objeto de verificar sus diferencias y contrastarlas con datos de referencia.
- Perfiles aerodinámicos. Los fabricamos con impresoras 3D con la intención de comprobar la calidad de los modelos obtenidos con esta tecnología. Utilizaremos distintas impresoras y procesos de fabricación para evaluar cuál es el más adecuado. Además realizaremos medidas de rugosidad sobre los mismos y evaluaremos la importancia de este parámetro sobre los coeficientes adimensionales de los perfiles.

1.3 Fases del proyecto y recursos disponibles

Las actividades que se han de realizar para la elaboración de este proyecto son las siguientes:

1. Revisión de documentación relativa al túnel aerodinámico
2. Adquisición de conocimientos y habilidades prácticas sobre el funcionamiento del túnel aerodinámico y de la instrumentación básica de medida de velocidades, presiones, condiciones ambientales y fuerzas aerodinámicas
3. Comprobación de la uniformidad del flujo en la sección de ensayos
4. Calibración de la balanza aerodinámica
5. Diseño CAD del perfil aerodinámico a fabricar
6. Obtención de los perfiles mediante impresora 3D
7. Fabricación de las varillas y fijación de las mismas en los perfiles
8. Medida de las fuerzas de sustentación y arrastre en los dos perfiles fabricados
9. Medida de la rugosidad media aritmética en los perfiles
10. Comparación de los resultados obtenidos en túnel con datos de referencia
11. Conclusiones y evaluación de los resultados obtenidos.

Capítulo 2. Instalaciones experimentales y equipos

2.1 Túnel aerodinámico

2.1.1 Tipo y características generales del túnel aerodinámico. Funcionamiento

2.1.1.1 Características de los principales elementos del túnel aerodinámico

2.2 Instrumentación

2.2.1 Instrumentación para la caracterización del flujo

2.2.1.1 Manómetro inclinado de columna de líquido

2.2.1.2 Tubo de Pitot

2.2.2 Instrumentación para medida de fuerzas aerodinámicas

2.2.3 Instrumentación para medida de las condiciones ambientales

2.1 Túnel aerodinámico

2.1.1 Tipo y características generales del túnel aerodinámico. Funcionamiento

Existen diferentes formas de clasificar el túnel de viento con el que vamos a trabajar en función de los parámetros considerados:

- a) Atendiendo a la situación del ventilador en el túnel, nos encontramos con un túnel de aspiración. Ya que el ventilador se encuentra colocado aguas abajo de la sección de ensayo.
- b) Atendiendo a la reutilización del aire de salida del túnel es abierto. De modo que el aire es expulsado al exterior.
- c) Atendiendo a la velocidad máxima alcanzada estamos trabajando con un túnel subsónico. Por lo tanto el número de Mach alcanzado es menor que 1.
- d) La sección de ensayos es cerrada. Lo que en general nos garantizará un flujo más uniforme en la cámara de ensayos.

En nuestro túnel en aspiración, el ventilador se encuentra situado aguas abajo de la sección de ensayo. La admisión de aire está controlada mediante una campana de entrada, y la cámara de ensayo no está precedida ni seguida por ningún honeycomb.

La entrada es de forma aerodinámica, para asegurar una entrada de aire progresiva y sin formación de vórtices residuales. Pasada la cámara de ensayo, se sustituye el canal por otro de forma cónica y divergente, de forma que el ventilador trabaja en una sección mayor (lo que provoca una recuperación de la presión estática y una disminución de la dinámica; esto permite al ventilador trabajar a menor velocidad para un mismo caudal). Pasado el ventilador se coloca una rejilla de modo que permite una difusión periférica del aire desde el ventilador (esto disminuye la velocidad en el punto de descarga, por lo que las pérdidas de energía disminuyen).

Como se trata de un túnel subsónico abierto, el aire es lanzado a la atmósfera después de pasar a través del mismo. La distribución de velocidades en túneles de circuito abierto de este tipo es uniforme, mientras que la turbulencia es alrededor del 1,5%.

La distribución de velocidades se puede mejorar en túneles de circuito abierto, y el nivel de turbulencia disminuir, mediante la colocación de rejillas y honeycombs.

En túneles de circuito abierto con cámara de ensayo cerrada la presión es menor que en el medio que lo rodea (en el caso de túneles en aspiración). Esto hace más difícil llevar a cabo los ensayos e introduce errores en la determinación de las fuerzas que actúan sobre el modelo, ya que se introduce aire desde la atmósfera al interior de la sección de ensayo, a través de las aperturas de los soportes del modelo.

2.1.2 Características de los principales elementos del túnel aerodinámico

En un túnel de viento en aspiración el aire que inicialmente está en reposo es absorbido y forzado a su movimiento básicamente por la acción del ventilador. La campana de entrada hace que el aire se introduzca en el interior del túnel con una mayor suavidad evitando la formación de torbellinos y la disminución del espesor de la capa límite. Posteriormente pasa a través de las rejillas y del honeycomb haciendo que el flujo turbulento sea lo más uniforme posible. Luego pasa por la cámara de ensayo que es el lugar donde se realizan las distintas pruebas, para seguir por el difusor aumentando la presión al final de este, disminuyendo la velocidad y por consiguiente las pérdidas de carga y el desprendimiento de la capa límite. Por último el aire circula por el ventilador, aumentando su presión y es descargado a la atmósfera a través de un conducto de impulsión con válvula de mariposa que permite regular el caudal.

La puesta en marcha de la instalación se realiza a través de un panel de mandos situado cerca del ventilador y que se encarga de conectar y desconectar el ventilador, con el también se puede modificar la frecuencia del motor eléctrico y por tanto el régimen de giro del ventilador.

También se pueden realizar las operaciones anteriores mediante un programa de ordenador, estando conectado al panel de control anteriormente citado. Una descripción más detallada puede verse en el proyecto fin de carrera de LEGAZ-GARCÍA (2002).

La instalación de túnel de viento subsónico abierto de cámara de ensayo cerrada que hemos utilizado, la forman los siguientes elementos:

- Campana de entrada
- Rejilla y Honeycombs
- Contracción
- Cámara de ensayo
- Difusor
- Ventilador



Figura 2.1 Representación general del túnel de viento

a) Campana de entrada

La campana de entrada es un elemento aerodinámico colocado en la parte inicial del túnel cuya función es la de reducir el espesor de la capa límite y que el flujo sea lo más estacionario posible a la entrada, evitando la formación de remolinos y el desprendimiento de la capa límite a la entrada de la contracción. Consiguiendo con esto que la velocidad sea más uniforme y la intensidad de turbulencia disminuya.

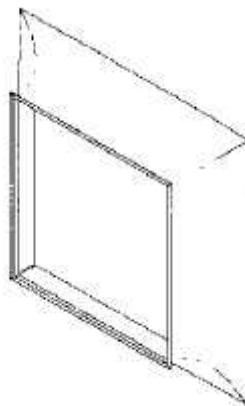


Figura 2.2 Representación de la campana de entrada

b) Rejilla y Honeycomb

Las rejillas son alambres de metal entrecruzados ortogonalmente, formando mallas, cuyas dimensiones dependen de las del túnel. La función principal de estas rejillas es la de disminuir la turbulencia del flujo en la sección de ensayo, formando una malla que ocupa toda la sección transversal, suavizando las irregularidades del flujo y aumentando la uniformidad del flujo. Es importante el diámetro de este alambre utilizado, ya que si el diámetro es elevado se introducen unas pérdidas de carga demasiadas elevadas. Su colocación debe ser lo más alejada posible de la sección de ensayo, a demás es conveniente la utilización de varias mallas colocadas sucesivamente, a una distancia suficiente como para que el flujo se estabilice tras haber pasado por la rejilla anterior, pero no demasiada, ya que implicaría un crecimiento de la capa limite. Una distancia aconsejable seria de 0.2 veces la distancia entre la ultima malla y la entrada a la contracción.

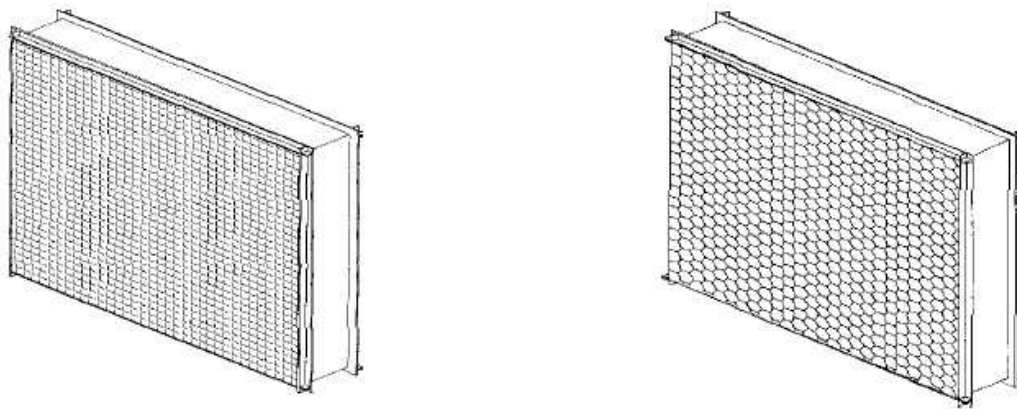


Figura 2.3 Representación de la rejilla y del Honeycomb

El Honeycomb como su propio nombre indica es una estructura similar a un panal de abejas, cuyas celdas tienen forma hexagonal de 0.5-2 mm. de grosor de la pared, y un espesor de 5-10 veces el ancho de la celda.

Este elemento es efectivo para eliminar la vorticidad y componentes laterales de la velocidad, para ángulos de guiñada menores de 10° . También otra función que desempeña, y no menos importante, es aumentar la uniformidad del flujo. El inconveniente es que al colocar este elemento introducimos una pérdida de carga y provocamos que aumente débilmente la intensidad de turbulencia, siendo este aumento mayor cuando el flujo es laminar que cuando es turbulento. Esto fue comprobado en el proyecto final de carrera de (ROCHEL & GARCÍA, 2003).

c) Contracción

La contracción es un elemento muy importante ya que de él depende el éxito de la uniformidad del flujo en la sección de ensayo. Su principal función es la de acelerar el aire disminuyendo gradualmente la sección de paso del fluido. Esta aceleración progresiva del flujo es la que permite que no se produzca desprendimiento de la capa límite.

d) Cámara de ensayo

La cámara de ensayo, es un elemento cuyo objetivo es el de permitir la realización de los diferentes ensayos en su interior. La de nuestro túnel tiene unas dimensiones interiores de 400x400 mm y de 480x480 mm teniendo en cuenta el marco, que nos permitirá atornillar la sección al resto del túnel, además de una longitud de 1000 mm. Suele estar formado por materiales transparentes para poder visualizar el comportamiento del flujo, también se suelen visualizar los flujos mediante generadores de humo, los cuales siguen las trayectorias de las líneas de corrientes. En ella el flujo debe ser lo más uniforme posible para que la realización de los ensayos sea más precisa. También es aconsejable que dicha sección sea desmontable para facilitar su utilización. La ubicación más adecuada, es detrás de la contracción a una distancia de 0.5 veces el diámetro, su distancia es necesaria para aumentar la uniformidad del flujo. Para ensayos relacionados con la aeronáutica, esta longitud se suele fijar entre 1.5 y 2 veces el diámetro.

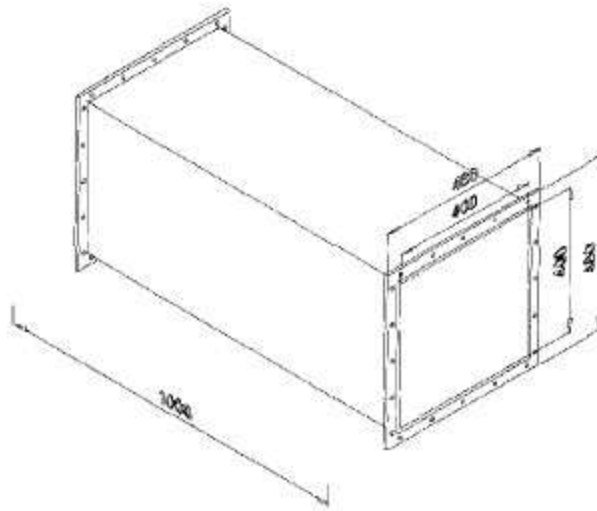


Figura 2.4 Sección de ensayos

e) Difusor

El difusor es un ensanchamiento progresivo del conducto que está colocado en la parte posterior de la cámara de ensayo. Este ensanchamiento suele estar diseñado con un ángulo entre 5 y 10°, en túneles convencionales, para que no haya una separación del flujo en las paredes del conducto, consiguiendo con esto la uniformidad del flujo y unas pérdidas de carga pequeñas. La función que desempeña es la de convertir la energía cinética en presión, la eficacia de esta transformación dependerá de variables tales como, el ángulo de divergencia, distribución de velocidades a la entrada, etc.

f) Ventilador

El ventilador es una pieza fundamental en la instalación, puesto que es el encargado de forzar el movimiento del aire a través del túnel manteniendo un caudal constante a lo largo del tiempo. El tipo de ventilador utilizado, es un ventilador centrífugo.

Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máx. admisible		Potencia (KW)	Caudal máx. (m ³ /h)	Nivel presión sonora (Lp) dB(A)	Peso aprox. (Kg)
		230V(A)	400V(A)				
CMR-2271-4T	1465	-	21.9	11	34610	86	308

Tabla 2.1 Características principales del túnel de viento

2.2 Instrumentación

El conocimiento de la instrumentación es esencial para la obtención y correcta interpretación de los resultados obtenidos mediante los diferentes equipos. La instrumentación utilizada se puede clasificar en:

- Instrumentación para la caracterización del flujo
- Instrumentación para medidas de fuerzas aerodinámicas
- Instrumentación para medida de condiciones ambientales

2.2.1 Instrumentación para la caracterización del flujo

Al introducir cualquier elemento dentro de la cámara de ensayo, este provocará una distorsión en el flujo ya que el equipo que se introduce por muy pequeño que sea, al tener unas determinadas dimensiones provoca una distorsión en dicho flujo. Lógicamente cuando se quiere conocer la velocidad o presión en un punto determinado implica colocar el instrumento en el punto deseado provocando una interferencia alrededor de él. Y si estamos midiendo cerca de un cuerpo que hayamos introducido en la cámara de ensayo es la variación del flujo también se transmitirá al cuerpo.

2.2.1.1 Manómetro inclinado de columna de líquido

El manómetro de columna de agua se utiliza para medir la diferencia de alturas que existe entre dos columnas. Estos incrementos de alturas se miden en m.c.a.

A la hora de observar el incremento de altura hay que tener en cuenta al ángulo de dicha inclinación. Para nuestro caso el manómetro utilizado ya contiene dicha corrección, lo cual cada división se corresponde a la distancia en m.c.a, utilizada para calcular la presión, ya que el valor que ofrece ya tiene en cuenta el ángulo que forma con la horizontal. De no ser así se tendría que multiplicar la distancia medida entre columnas por el ángulo que forma el manómetro con la horizontal, como expresa la siguiente fórmula:

$$\Delta h = \Delta l \cdot \sin 30^\circ$$

El manómetro inclinado se puede representar mediante la siguiente figura:

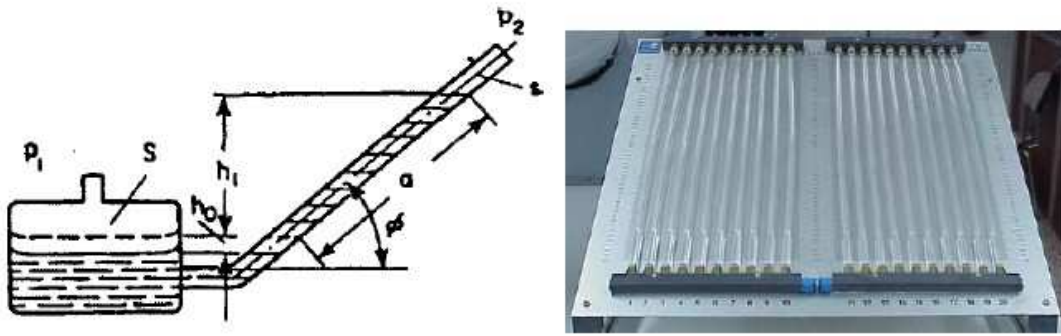


Figura 2.5 Manómetro inclinado

El líquido que utilizan estos manómetros puede ser de agua, alcohol, queroseno, éter, mercurio, entre otros. La utilización de unos u otros depende de la estabilidad del compuesto y el lugar en el que se va a utilizar. Para el caso que nos concierne, las condiciones de medida, al ser las condiciones atmosféricas, el líquido utilizado fue agua.

Al utilizar un manómetro inclinado se obtiene una mayor sensibilidad. Este, amplía la escala, facilitando la exactitud de la lectura cuando se trata de pequeñas variaciones de presión, esta exactitud del equipo depende de la pendiente de las tubos. En consecuencia la base del manómetro debe ser cuidadosamente nivelada y montada sobre un soporte robusto que permita efectuar adecuadamente dicha nivelación. El manómetro inclinado-vertical es una modificación del manómetro inclinado, en la que la rama indicadora se curva para dar una parte inclinada y la otra vertical, con la ventaja de un menor espacio ocupado pero manteniendo el refinamiento de la medida que proporciona el manómetro inclinado.

En ocasiones es necesario conocer la velocidad o la presión en distintos puntos simultáneamente por lo que resulta más cómodo y eficaz el uso de un multimanómetro. El utilizado en la adquisición de medidas es un multimanómetro inclinado de 24 tubos de 500 mm siendo el ángulo de inclinación de 30°.

2.2.1.2 Tubo de Pitot

El tubo de Pitot permite determinar en función de la presión dinámica, la velocidad media en un punto cualquiera de la sección de ensayo. Está formado por dos tubos concéntricos situados en dirección paralela al flujo en el cual vamos a realizar la medida. Las dimensiones del tubo pueden variar dependiendo del espacio disponible y de la precisión que necesitemos obtener, ya que cuanto mayor sea la longitud y el diámetro del tubo mayores pérdidas habrá por lo tanto mayor imprecisión en la lectura de las medidas. La parte delantera del tubo se encuentra abierta al flujo, quedando ambos alineados, pero en sentido contrario, obteniéndose un punto de remanso en el que la presión medida corresponde a la suma de las presiones estática y dinámica. La toma de presión estática se encuentra situada alrededor del tubo, formada por tubos circundantes y perpendiculares a la dirección del flujo, por esto la presión medida será estática. Al conectar estas salidas a un manómetro se podrá observar la diferencia de presión entre ambos, obteniendo la presión dinámica.

A continuación se representa de forma esquemática el tubo de Pitot con un corte longitudinal.

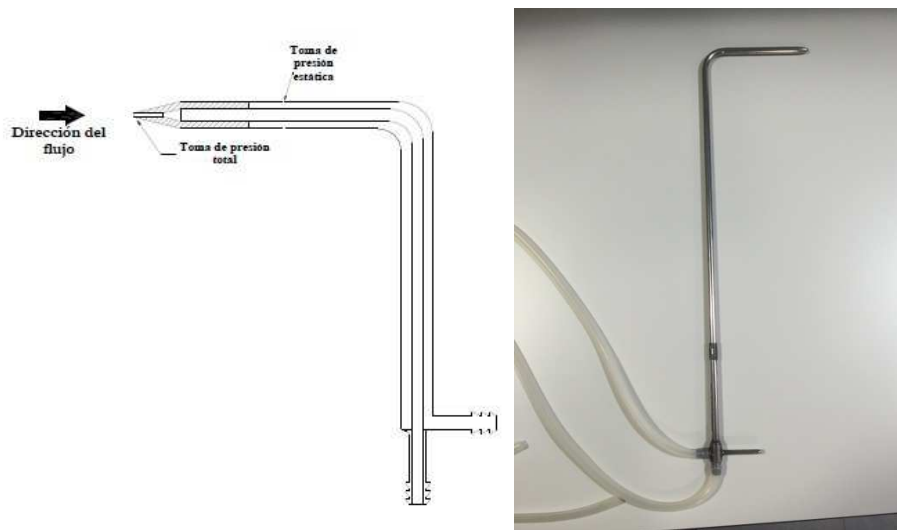


Figura 2.6 Tubo de Pitot

Para obtener la velocidad a partir de la lectura del manómetro inclinado conectado a las tomas de un tubo de Pitot se realizan los siguientes cálculos:

$$\Delta P = p_0 - p_e = p_d = \rho_{agua} \cdot g \cdot \Delta h$$

$$\Delta P = p_0 - p_e = p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot U^2 \quad \rho_{aire} = \frac{P_{atm}}{T_{atm} \cdot R_g}$$

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{agua} \cdot g \cdot \Delta h}{P_{atm} / T_{atm} \cdot R_g}}$$

Siendo, p_e , la presión estática absoluta en Pa; p_0 , la presión de remanso en la cámara de ensayo en Pa; Δh , el incremento de altura obtenido del manómetro inclinado; R_g , la constante de los gases cuyo valor es 287 J/kgK; T_{atm} , la temperatura ambiente durante la medida; P_{atm} , la presión ambiente durante la medida; ρ_{aire} la densidad del aire en Kg/m³; ρ_{agua} la densidad del agua en Kg/m³; p_d , la presión dinámica medida en Pa; g , la gravedad cuyo valor es 9.81 m/s² y U es la velocidad en el punto que hemos realizado la medida en m/s.

2.2.2 Instrumentación para medida de fuerzas aerodinámicas

La balanza aerodinámica se utiliza en experimentos en los que se quieren obtener las principales fuerzas que el flujo ejerce sobre un cuerpo en reposo, estas fuerzas son las de arrastre y sustentación, siendo su conocimiento fundamental para la mayoría de las aplicaciones aerodinámicas. Estas fuerzas dependen de distintos factores, como pueden ser la geometría del cuerpo considerado, el acabado superficial, la intensidad de turbulencia en interior del túnel, los espesores de la capa límite en las paredes de la cámara de ensayo, la temperatura y humedad del aire.

Básicamente la balanza, está formada por un soporte vertical sobre el que se dispone una plataforma horizontal que sujeta una estructura deformable formada por cuatro barras prismáticas de sección cuadrada. Sobre estas barras se adhiere las galgas extensiométricas, de modo que al deformarse la estructura se genera una señal eléctrica proporcional que debidamente acondicionada da una indicación del arrastre y la sustentación a que se encuentra sometido el cuerpo en el flujo y que también está unido a dicha estructura.

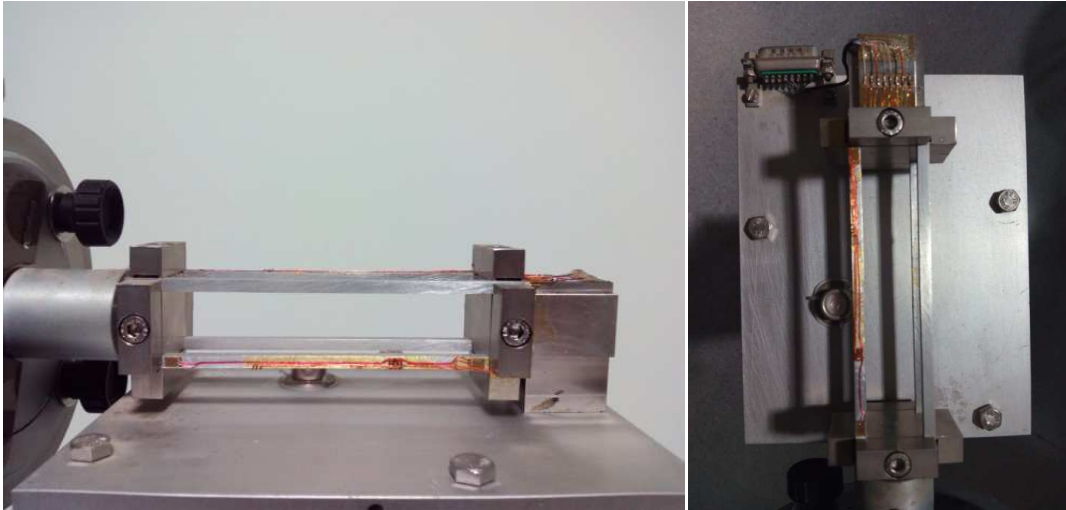


Figura 2.7 Distribución de las galgas extensiométricas en la balanza aerodinámica

Partes de la balanza aerodinámica

- Columna de apoyo. Permite a la balanza mantenerse independientemente de la sección de ensayo. Además proporciona la rigidez necesaria para una correcta toma de medidas.

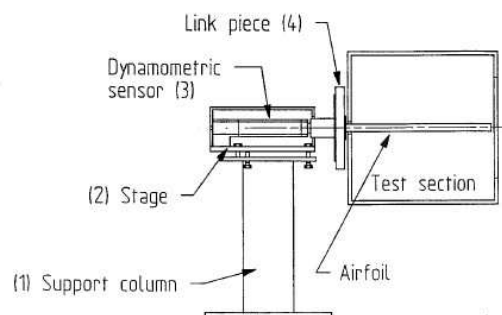


Figura 2.8 Esquema de la balanza aerodinámica

- Plataforma. Es utilizada para orientar la balanza con respecto a la sección de ensayos.

- La parte equipada con la galga extensiométrica, fija a las superficies sometidas a flexión por los efectos dinamométricos, es la más importante de la balanza. Los efectos de la sustentación, el arrastre y el momento de cabeceo están aislados por el sistema de cableado de la galga. La balanza no incluye ninguna conexión parcial y por lo tanto no está sometida a histéresis inducida por la fricción.

- Pieza de unión. Permite ajustar el modelo en la balanza y también variar el ángulo de ataque.
- Unidad electrónica de medida. Desempeña las siguientes funciones: es la fuente de potencia del sistema, sirve para amplificar el desequilibrio, tiene una pantalla digital para la lectura de las fuerzas y momentos y además contiene un selector para elegir entre la sustentación, el arrastre o el momento de cabeceo.

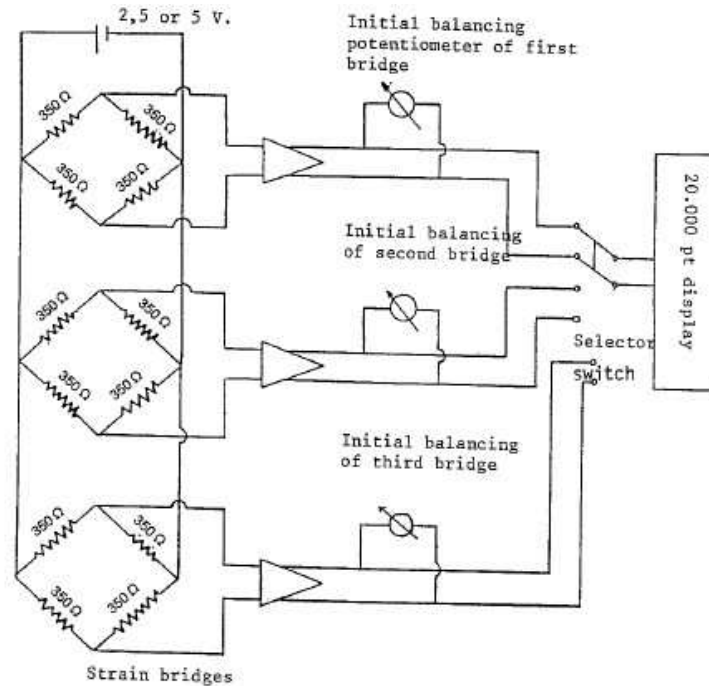


Figura 2.9 Esquema puentes de Wheastone

Proceso de instalación de la balanza aerodinámica

Se fija la columna metálica 10434 a la plataforma (ya sea a la mesa de manipulación o a una plataforma situada en el suelo del laboratorio), si es posible independiente de la sección de ensayos, para así evitar cualquier vibración de la sección del flujo que pueda afectar a la balanza.

Utilizar un nivel de burbuja de aire para asegurarnos de que el plato de la balanza 10459 está perfectamente horizontal, ya que a la menor variación se obtendrán datos erróneos al estar desequilibrada la balanza. El ajuste fino de la placa se puede llevar a cabo por medio de los tres tornillos de ajuste situados en los extremos de la placa, después de haber aflojado primero los tornillos de bloqueo (cf. Dwg 50065). La cubierta de plástico se puede quitar fácilmente de la balanza mediante la retirada de los pernos en la parte superior.

Hay que llevar cuidado de no tocar la galga extensiométrica los cables de conexión, y dejar una holgura de 2 mm entre el disco grande y la pared de la sección de ensayos.

Para la colocación de los perfiles hay que introducir el mismo en la sección de ensayo e insertar el eje del perfil dentro del disco de ajuste del ángulo de ataque. Lo bloqueamos en su posición por apriete del tornillo roscado 103565, con cuidado de hacer coincidir este tornillo con la pequeña zona rebajada hecha al final del eje del perfil.

Cuando se necesite ajustar el ángulo de ataque del perfil, si todavía no ha sido fijada, hay que pegar cuidadosamente la etiqueta autoadhesiva con la graduación del ángulo de incidencia sobre la parte posterior del disco grande.

Aflojamos ligeramente los tornillos grandes negros en el disco de ajuste del ángulo de ataque y luego podemos ajustar el ángulo de ataque del perfil girando el disco grande con las dos manos. Ajustamos la posición del perfil, haciendo que el punto negro grabado en el deflector del perfil coincida con el ángulo de ataque deseado.

Se debe evitar hacer ajustes del ángulo de ataque o aflojar el tornillo con el que fijamos el perfil cuando el túnel de viento está en funcionamiento, de lo contrario el perfil girará a través de la corriente de flujo y dañará irremediablemente el sensor dinamométrico de la balanza.

Para la toma de medidas conectamos el cable de alimentación de la unidad electrónica y activamos el interruptor ON / OFF. Con el ventilador de túnel de viento apagado y la hoja del perfil en la posición adecuada, ajustamos a cero cada uno de los componentes por medio de los potenciómetros, asegurándonos de que el selector de canal está ajustado en la posición correspondiente.

Encendemos el túnel de viento y esperamos unos minutos para que la medición se estabilice. El valor es entonces leído en N o N·m en la pantalla.

En la balanza de tres componentes, el momento de cabeceo determinado es el momento con respecto al eje de rotación de la balanza (y no con respecto al eje del perfil que pasa por el centro de empuje). Pero este no es nuestro caso, ya que nuestra balanza solo es capaz de medir sustentación y arrastre.

Por último la información queda reflejada en una pantalla digital pudiéndose ver indistintamente (pero no de forma simultánea), la fuerza de arrastre o de sustentación cambiando de posición con el interruptor.



Figura 2.10 Balanza aerodinámica

Algunas de las características técnicas más importantes de la balanza son las siguientes,

	EI 410
Envergadura	300 mm
Sustentación máxima	8 daN
Arrastre máximo	8daN
Momento de cabeceo máximo (con respecto al eje de rotación)	-

Tabla 2.2 Características técnicas principales de la balanza

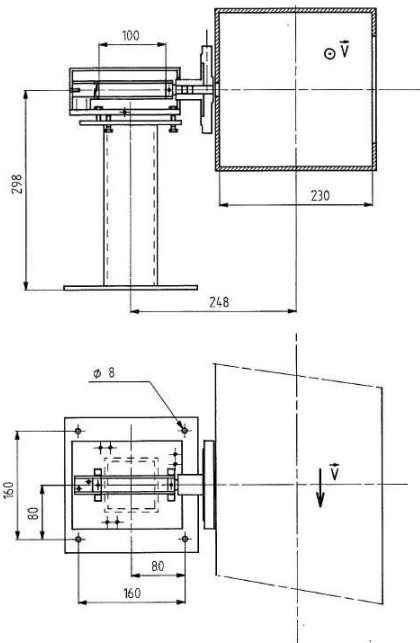


Figura 2.11 Esquema de las dimensiones de la balanza

2.2.3 Instrumentación para medida de las condiciones ambientales

Para medir las condiciones ambientales se ha utilizado una estación meteorológica. En concreto el WS-9257F-IT de La Crosse Technology.

Como observamos en la figura 3.12, con este dispositivo podemos tomar los datos de presión atmosférica, humedad relativa y temperatura ambiente. Estos son parámetros comúnmente medidos, ya que influyen en un alto porcentaje de los experimentos que se realizan en los túneles de viento.



Figura 2.12 Estación meteorológica

Las medidas de temperatura de este aparato tienen una precisión de 0.1°C y las de la humedad un 1%. La precisión de la medida de la presión no la encontramos en el manual, por lo que haremos una suposición para la obtención de la misma. Midiendo la presión en pulgadas de mercurio la última cifra significativa son la centésimas. Por lo que tomando 0.02 pulgadas de mercurio como la precisión de la estación meteorológica, tenemos que este valor es igual a 68 Pa. Las características y especificaciones de este equipo las podemos encontrar más desarrolladas en el manual del equipo (LA CROSSE TECHNOLOGY, 2013).

Capítulo 3. Pruebas y ajuste de los equipos

3.1 Introducción

3.2 Ensayos de evaluación del flujo de la cámara de ensayos

3.2.1 Ensayo de uniformidad del perfil de velocidades medias

3.2.2 Ensayo para la determinación de las distintas velocidades del túnel aerodinámico

3.3 Medida del arrastre y sustentación mediante balanza aerodinámica

3.3.1 Primera prueba de calibración de la balanza aerodinámica

3.3.2 Segunda prueba de calibración de la balanza aerodinámica

3.3.3 Tercera prueba de calibración de la balanza aerodinámica

3.4 Incertidumbre en las medidas

3.4.1 Introducción

3.4.2 Error experimental. Definición de términos

3.4.3 Expresión de la incertidumbre de medida

3.4.4 Procedimiento general para el cálculo de la incertidumbre en las medidas

3.4.5 Cálculo de la propagación de la incertidumbre de las medidas en el resultado

3.4.5.1 Incertidumbre en las medidas de velocidad

3.4.5.2 Incertidumbre en las medias de fuerzas aerodinámicas y coeficientes de sustentación y arrastre

3.1 Introducción

En el capítulo anterior hemos presentado la instalación de la que nos vamos a servir para la realización del presente trabajo, así como de la instrumentación necesaria para la puesta a punto y toma de medidas en la misma.

Como el túnel de viento presentado ha sido trasladado de su ubicación original es posible que sus características de funcionamiento se hayan visto afectadas. Tenemos que tener en cuenta la antigüedad y el tiempo en desuso tanto del túnel como de su instrumentación.

Por lo tanto, en esta parte del trabajo vamos a evaluar las condiciones actuales del túnel y determinar si continúa siendo apto para la experimentación. Además realizaremos una puesta a punto de toda la instrumentación que no se encuentre defectuosa.

3.2 Ensayos de evaluación del flujo en la cámara de ensayos

3.2.1 Ensayo uniformidad del perfil de velocidades medias

Para comprobar la calidad del flujo dentro de la sección de ensayos, evaluamos la uniformidad del perfil de velocidades media.

Las medidas se realizaron a las distancias respecto al inicio de la cámara de ensayo, de 350 y 520 mm. Para cada una de estas distancias se efectuaron sendos barridos en dirección horizontal y vertical para los regímenes de giro del ventilador de 20, 30 y 40 Hz.

El programa de ensayos que se ha seguido para realizar el perfil de velocidades en la sección de ensayo ha sido la siguiente:

1. Montaje y prueba del sistema de medida
2. Ajustar los parámetros de adquisición
3. Fijar las diferentes U_{∞} de ensayo
4. Hacer barrido transversal en planos horizontal y vertical
5. Cambiar de sección de ensayo y repetir el proceso para las mismas velocidades

Las medidas se realizaron sin el honeycomb y han sido tomadas con el tubo de Pitot presentado en el apartado 2.2.1.2 del Capítulo 2, que no es necesario calibrar.

Tras los dos primeros ensayos, introducimos el perfil en la sección de ensayos y repetimos el procedimiento para la distancia de 520 mm. En la siguiente figura se observa el montaje realizado.



Figura 3.1 Montaje para la determinación de la uniformidad del perfil de velocidades media y para la medida de velocidades

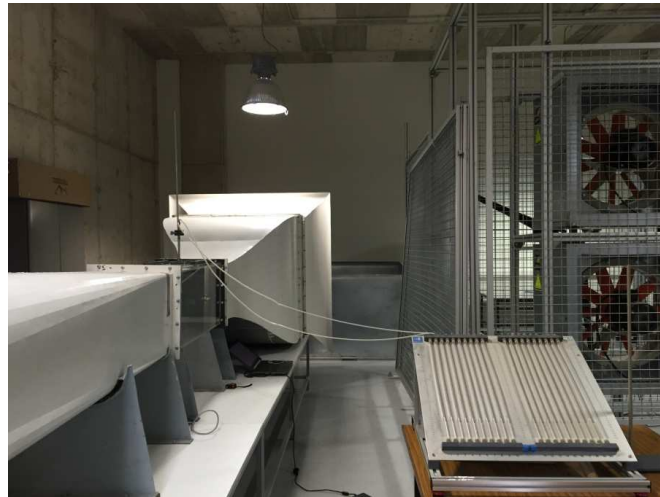


Figura 3.2 Conexión del tubo de Pitot al multimanómetro



Figura 3.3 Comprobación de la influencia del perfil en la uniformidad y en la velocidad del flujo

Los resultados obtenidos indican que no hay variación de la velocidad en los distintos puntos del barrido y, por tanto, podemos concluir que si hay uniformidad del perfil de velocidades medias.

No incluimos las tablas de los resultados obtenidos por la simplicidad de los mismos, ya que la mayor diferencia entre medidas que encontramos es inferior al 1%.

A partir de aquí, en el siguiente apartado calcularemos las velocidades para las distintas frecuencias a las que puede trabajar el túnel aerodinámico.

3.2.2 Ensayo para la determinación de las distintas velocidades del túnel aerodinámico

Para este nuevo ensayo vamos a volver a realizar los montajes que se pueden ver en la figuras 3.1, 3.2 y 3.3.

En este caso, a diferencia del anterior, no vamos a realizar ningún barrido. Sino que vamos a colocar el tubo de Pitot en un punto fijo de la sección de ensayo y vamos a modificar el régimen de giro del ventilador.

El ensayo se ha realizado para el rango de frecuencias de 5 Hz hasta 50 Hz, tomando una medida cada 5 Hz. Y de este modo podemos formar una gráfica en la que para cada frecuencia, obtengamos la velocidad correspondiente. Al igual que en el apartado anterior, se realizan medidas en distintas secciones de la cámara de ensayos. Estas volverán a ser 350 mm, 520 mm y 520 mm con presencia del perfil.

El programa de ensayos que se ha seguido para la obtención de las velocidades en la sección de ensayos es el siguiente:

1. Realizamos montaje del sistema
2. Conectamos el tubo de Pitot al multimanómetro
3. Medida de las condiciones ambientales
4. Puesta en marcha del túnel aerodinámico
5. Medida de la presión dinámica para cada una de las frecuencias del ventilador fijadas
6. Apagado del túnel

Con el tubo de Pitot estamos midiendo la diferencia entre la presión de remanso y la presión estática dentro de la cámara de ensayos, a partir de la que vamos a obtener la velocidad en la misma. En los cálculos hasta obtener dicha velocidad influye la densidad del aire, que va a ser función de las condiciones ambientales del momento en el que se realice el ensayo. Por lo tanto antes de cada ensayo y al final se toman las medidas de las condiciones ambientales y se comprueba su influencia en la velocidad en la sección de ensayos. Las ecuaciones utilizadas las hemos presentado en el apartado 2.2.1.2 del Capítulo 2.

Previamente a realizar los ensayos de medida de velocidades queremos comprobar si tiene relevancia tomar los datos aumentando la frecuencia o disminuyéndola a la distancia de 520 mm. Los dos ensayos que vamos a mostrar tienen como objetivo determinar dicha influencia.

Ensayo del 21/7/2015 a las 13:20 horas (aumentado la frecuencia)

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P _a (Pa)	T _a (°C)	T _a (K)	R _g (J/KgK)	ρ (kg/m ³)
101080	28,7	301,7	287	1,16736865

Frecuencia ventilador (Hz)	Δh (m)	ΔP (Pa)	U (m/s)
5	0	0	0
10	0	0	0
15	0,003	29,43	7,100780957
20	0,009	88,29	12,29891339
25	0,017	166,77	16,90323966
30	0,027	264,87	21,30234287
35	0,041	402,21	26,25049014
40	0,054	529,74	30,1260622
45	0,076	745,56	35,73981373
50	0,088	863,28	38,45801147

Tabla 3.1 Condiciones ambientales y velocidades del ensayo aumentando la frecuencia

Ensayo del 21/7/2015 a las 14:15 horas (disminuyendo la frecuencia)

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P _a (Pa)	T _a (°C)	T _a (K)	R _g (J/KgK)	ρ (kg/m ³)
101070	28,6	301,6	287	1,16764018

Frecuencia ventilador (Hz)	Δh (m)	ΔP (Pa)	U (m/s)
5	0,001	9,81	4,099161092
10	0,003	29,43	7,09995528
15	0,007	68,67	10,84536083
20	0,014	137,34	15,33765638
25	0,022	215,82	19,22676979
30	0,032	313,92	23,18835684
35	0,044	431,64	27,1907586
40	0,058	568,98	31,2182808
45	0,074	725,94	35,26231704
50	0,088	863,28	38,45353958

Tabla 3.2 Condiciones ambientales y velocidades del ensayo disminuyendo la frecuencia

De la observación de los datos de las tablas 3.1 y 3.2 llegamos a la conclusión de que el ensayo realizado de modo descendente es incorrecto, ya que el flujo en la sección de ensayos tarda demasiado en estabilizarse y las medidas obtenidas son sensiblemente mayores para las frecuencias bajas del ventilador. Por lo que los ensayos de medida de velocidades que realicemos a continuación los haremos aumentando la frecuencia. Esta afirmación la ratificamos nuevamente mediante el gráfico de la figura 3.4 que presentamos a continuación:

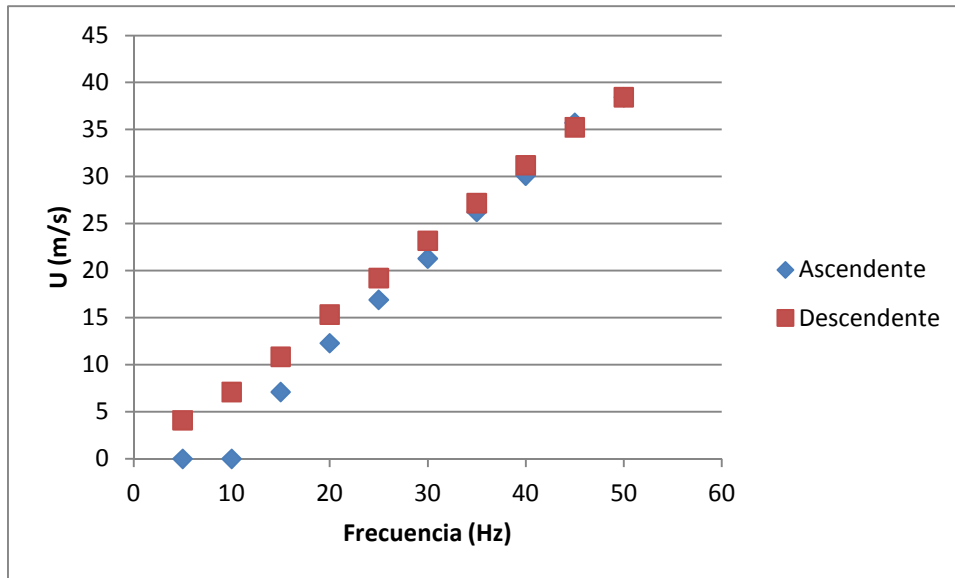


Figura 3.4 Comparación ensayo en el que aumentamos las frecuencia y en el que la disminuimos

Y aunque en el ensayo ascendente los valores de velocidad para frecuencias menores de 10 Hz son cero, no significa que el aire esté en reposo en la cámara de ensayos. Quiere decir que con los instrumentos de medida empleados no somos capaces de apreciar estas velocidades tan bajas del flujo, por lo que en nuestros ensayos consideraremos que se genera viento en el túnel a partir de 10 Hz.

Tras esta prueba, comenzamos con el primer ensayo de medida de velocidades siguiendo el programa de ensayos descrito al comienzo de este apartado.

Ensayo del 3/9/2015 a las 9:59 horas

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P_a (Pa)	T_a (°C)	T_a (K)	R_g (J/KgK)	ρ (kg/m ³)
100740	26,2	299,2	287	1,17316328

Frecuencia ventilador (Hz)	d = 350 mm		d = 520 mm		d = 520 mm (con perfil)	
	Δh (mm)	U (m/s)	Δh (mm)	U (m/s)	Δh (mm)	U (m/s)
5	1	4,08950055	0	0	0	0
10	1	4,08950055	0	0	0	0

15	2	5,783427142	3	7,083222731	3	7,083222731
20	9	12,26850165	8	11,56685428	9	12,26850165
25	16	16,3580022	18	17,35028142	17	16,86144272
30	25	20,44750275	27	21,24966819	26	20,85244311
35	38	25,20937446	40	25,86427246	39	25,53892275
40	53	29,7720134	54	30,05156895	52	29,48980785
45	65	32,9706075	69	33,96994286	68	33,72288545
50	85	37,70333213	86	37,92446794	84	37,48089165

Tabla 3.3 Datos ensayos con las condiciones ambientales iniciales

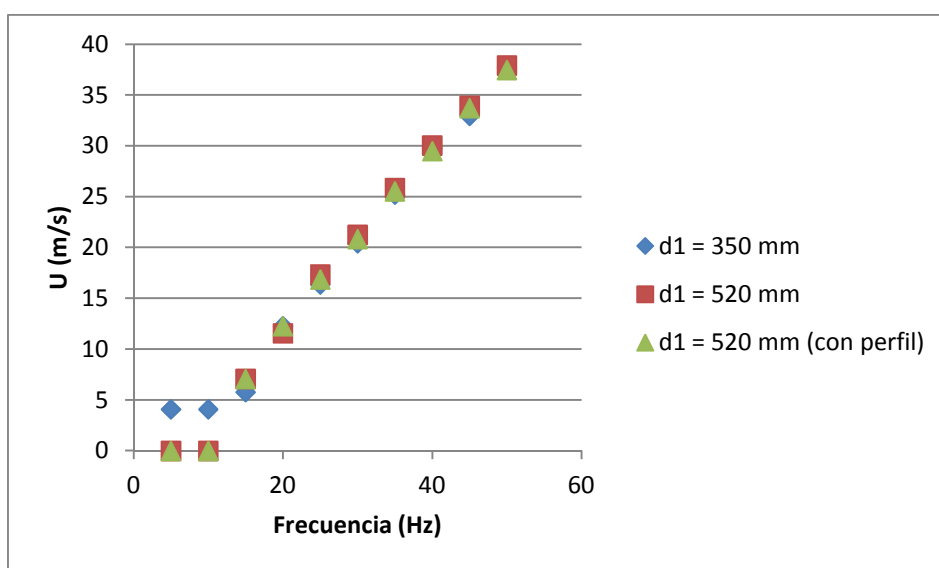


Figura 3.5 Comparación de los ensayos de variación de la velocidad con la frecuencia a distintas distancias y con presencia del perfil con las condiciones ambientales iniciales

Una vez finalizado el ensayo volvemos a medir las condiciones ambientales. Y utilizando los datos de Δh de la tabla 3.3 y estos datos ambientales que acabamos de tomar, calculamos nuevamente las velocidades en la sección de ensayos.

Ensayo del 3/9/2015 a las 12.01 horas

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P_a (Pa)	T_a (°C)	T_a (K)	R_g (J/KgK)	ρ (kg/m ³)
100760	26,9	299,9	287	1,17065735

Frecuencia ventilador (Hz)	d = 350 mm		d = 520 mm		d = 520 mm (con perfil)	
	Δh (mm)	U (m/s)	Δh (mm)	U (m/s)	Δh (mm)	U (m/s)
5	1	4,093875239	0	0	0	0
10	1	4,093875239	0	0	0	0
15	2	5,789613886	3	7,090799914	3	7,090799914
20	9	12,28162572	8	11,57922777	9	12,28162572

25	16	16,37550096	18	17,36884166	17	16,87948003
30	25	20,4693762	27	21,27239974	26	20,87474973
35	38	25,23634185	40	25,89194043	39	25,56624268
40	53	29,80386162	54	30,08371622	52	29,52135418
45	65	33,00587737	69	34,00628175	68	33,75896006
50	85	37,74366477	86	37,96503714	84	37,52098634

Tabla 3.4 Datos ensayos con las condiciones ambientales finales

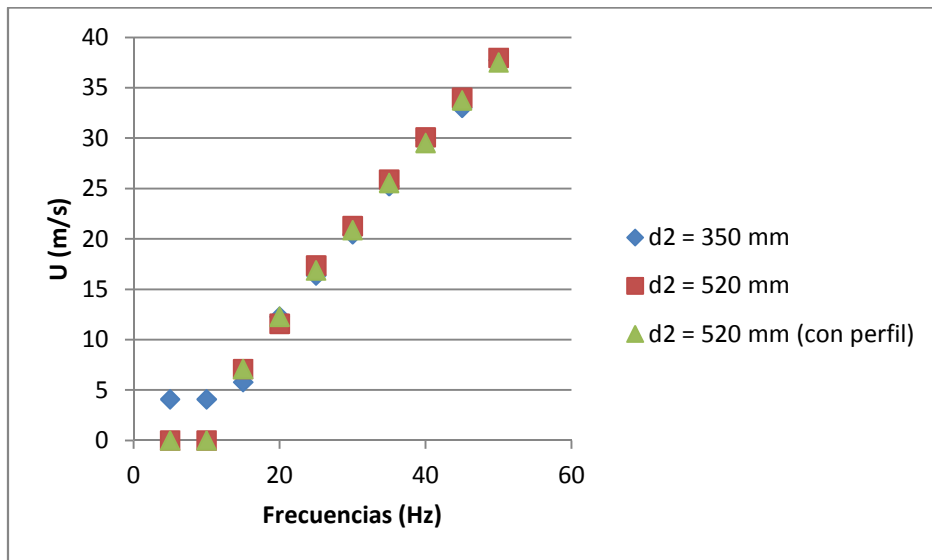


Figura 3.6 Comparación de los ensayos de variación de la velocidad con la frecuencia a distintas distancias y con presencia del perfil con las condiciones ambientales finales

A continuación comparamos los datos obtenidos en las tablas 3.3 y 3.4 en las siguientes gráficas:

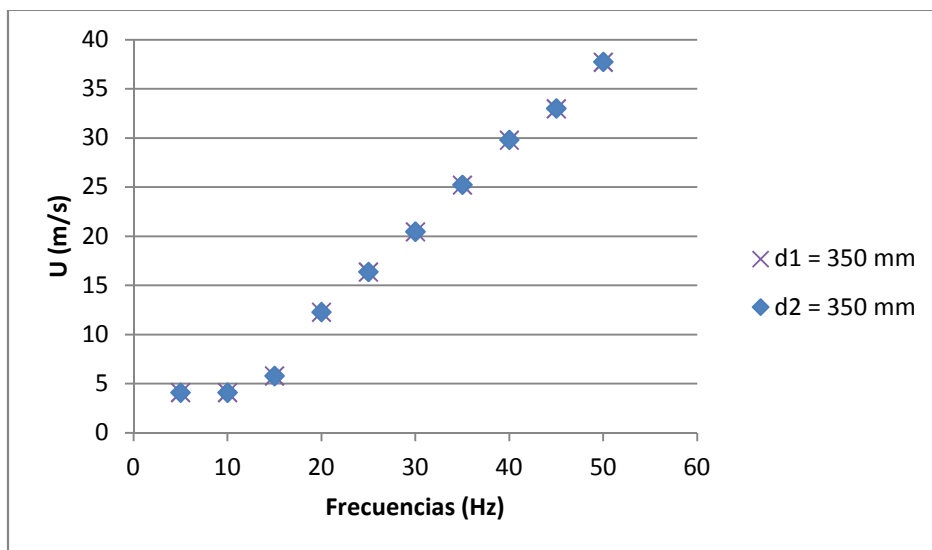


Figura 3.7 Comparación de la variación de la velocidad con la frecuencia a 350 mm con distintas condiciones ambientales

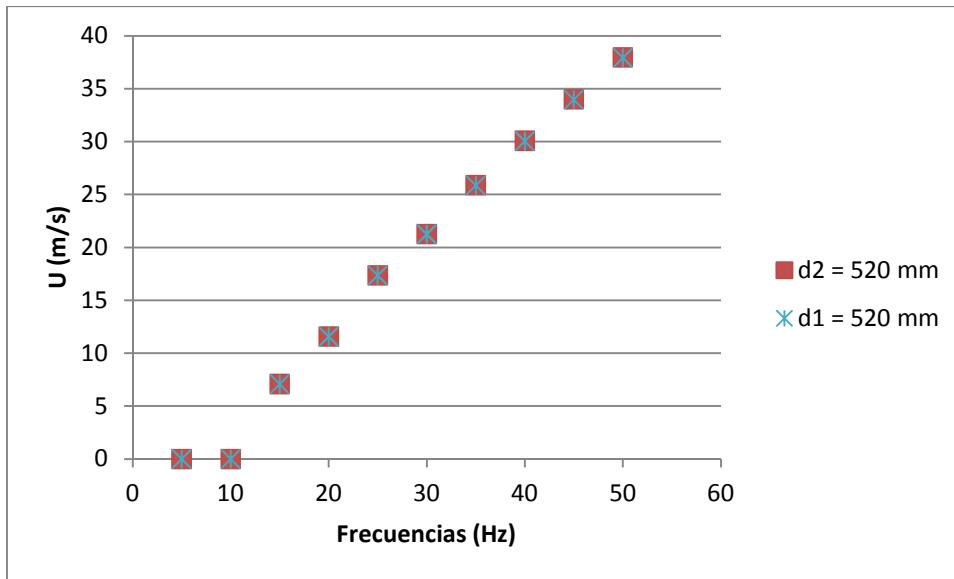


Figura 3.8 Comparación de la variación de la velocidad con la frecuencia a 520 mm con distintas condiciones ambientales

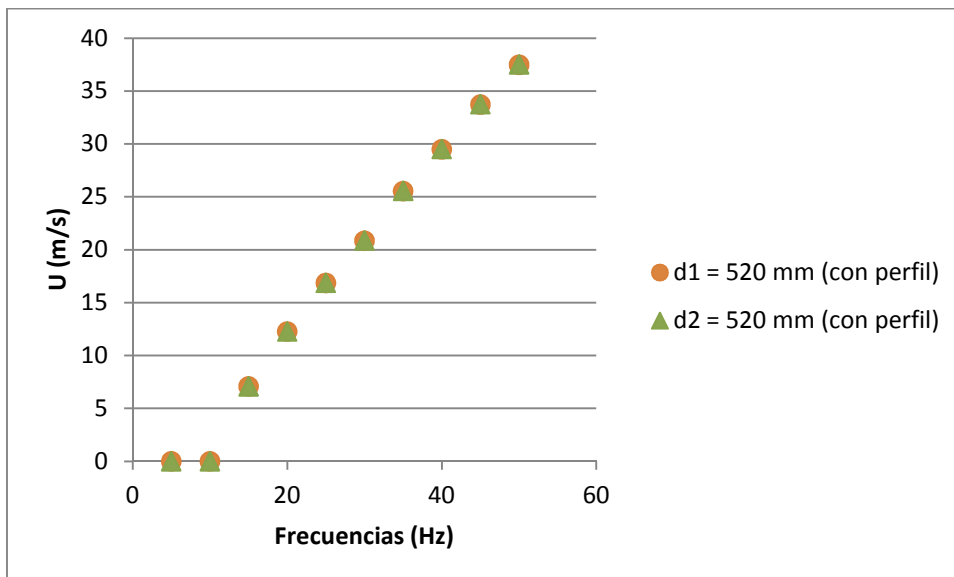


Figura 3.9 Comparación de la variación de la velocidad con la frecuencia a 520 mm y con presencia de perfil con distintas condiciones ambientales

Como comprobamos, los datos a una misma distancia pero a distinta densidad se superponen. Por lo que podemos estar seguros de que las variaciones en la densidad del aire no son relevantes a lo largo de la realización de un ensayo.

Por último, vamos a comparar la distribución de puntos ascendente, que ha sido tomada a 520 mm, y la que hemos obtenido a la distancia de 520 mm, con el valor de densidad del comienzo del ensayo:

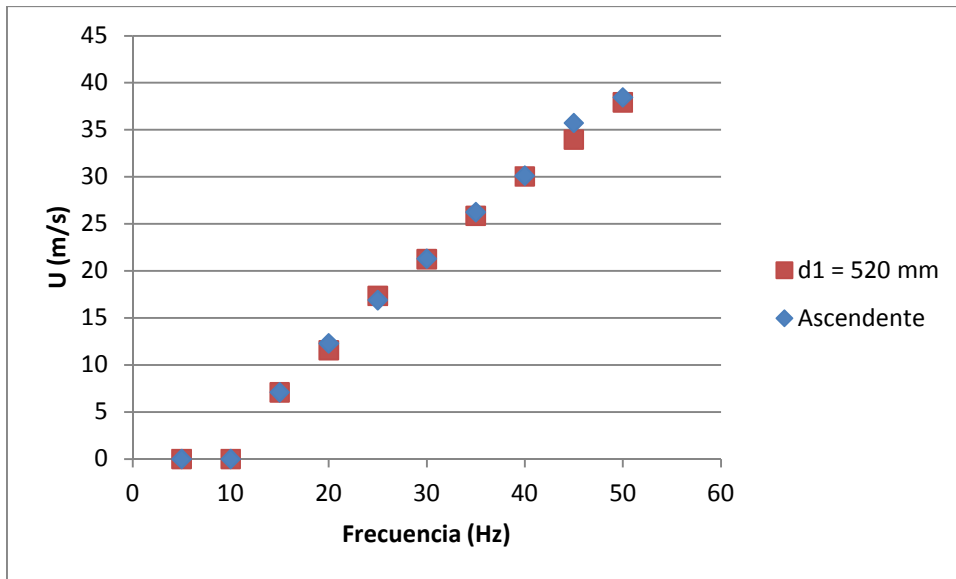


Figura 3.10 Comparación de dos pruebas de la variación de la velocidad con la frecuencia a distancia de 520 mm realizadas con un mes y medio de diferencia

Observando las distribuciones de la figura 3.10, que han sido obtenidas con un mes y medio de diferencia, vemos como las variaciones en las condiciones ambientales apenas tienen importancia. Las diferencias reflejadas en la gráfica anterior son principalmente producidas por fallos de precisión a la hora de la toma de datos.

Por lo tanto para los posteriores ensayos de medidas de fuerzas aerodinámicas utilizaremos los resultados obtenidos a la distancia de 520 mm en presencia del perfil, datos de velocidad que encontramos en la última columna de la tabla 3.3. Este será el ensayo que más se ajuste a las condiciones exactas en la sección de ensayos durante la realización de cada una de las pruebas de medida de fuerzas y lo mostramos en la figura 3.11

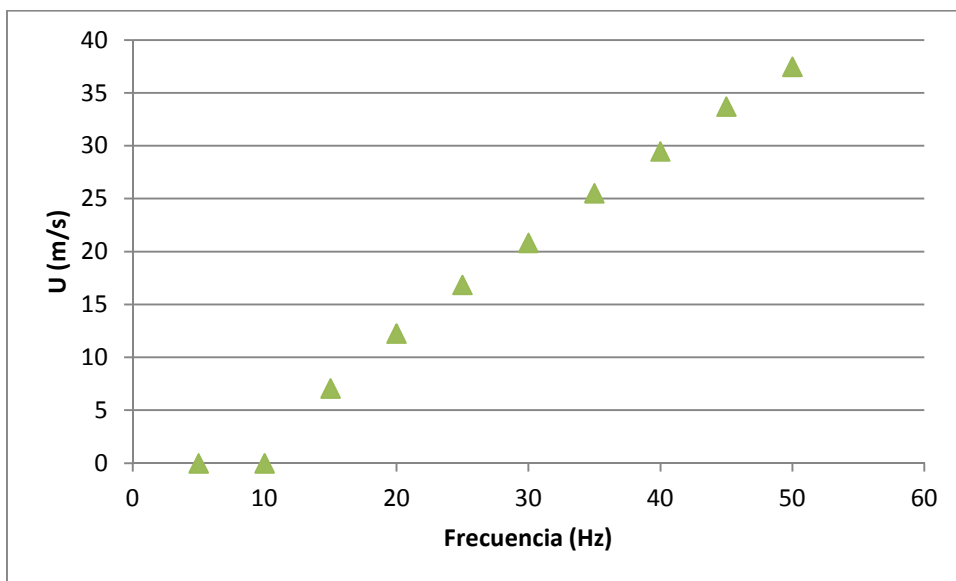


Figura 3.11 Ensayo de variación de la velocidad con la frecuencia utilizado en las pruebas de medida de fuerzas aerodinámicas

3.3 Medida del arrastre y la sustentación mediante balanza aerodinámica

La medida de las fuerzas de arrastre y sustentación se realizó con una balanza aerodinámica modelo EI 410 de Eurociencia, que permite la medida de estas dos componentes.

Antes de la realización de las medidas en el túnel se realizó su calibración. El procedimiento de calibración consistió en aplicar en el centro de gravedad de un perfil acoplado a la balanza pesos calibrados, y correlacionar esos pesos con los datos ofrecidos por la balanza. La calibración debe realizarse de modo independiente para sustentación y arrastre, ya que debe modificarse la dirección de la fuerza aplicada.

Realizamos un montaje con perfiles de estantería y roldanas para llevar a cabo los ensayos de calibración de la balanza aerodinámica. Y para comparar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos disponemos de unos datos de referencia obtenidos de (ROCHEL & GARCÍA, 2003) y que son los siguientes,

Número	Peso (N)	Lectura (N)
1	0,0000	0,0000
2	0,4905	0,4500
3	0,6867	0,6900
4	0,8829	0,8100
5	1,3734	1,2600
6	1,8639	1,7200
7	2,3544	2,1700
8	2,8449	2,7000
9	3,3354	3,0900
10	3,8259	3,5300
11	4,3164	4,0200
12	4,8069	4,7100

Tabla 3.5 Ensayo de sustentación de referencia

Número	Peso (N)	Lectura (N)
1	0,00000	0,00000
2	7,61256	7,65000
3	11,04606	10,98000
4	15,30360	15,18000
5	20,83644	20,56000
6	26,38890	26,02000
7	37,70964	36,80000
8	43,41906	42,50000

Tabla 3.6 Ensayo de arrastre de referencia

Hasta llegar a los resultados buscados realizamos distintos ensayos, que se detallan a continuación.

3.3.1 Primera prueba de calibración de la balanza aerodinámica

Para esta primera prueba, he supuesto que la fuerza de sustentación se producía en el centro de masas del perfil. Vamos a utilizar dos juegos de pesos calibrados, uno que viene indicado en Newtons y otro en kilogramos. Para esta prueba no podíamos ajustar el cero de la balanza para la primera medida, por lo que sobre los datos obtenidos realizamos un ajuste.



Figura 3.12 Ensayo para determinar el centro de masas del perfil

Calibración para la fuerza de sustentación

En un primer momento lo íbamos a realizar utilizando dos roldanas.

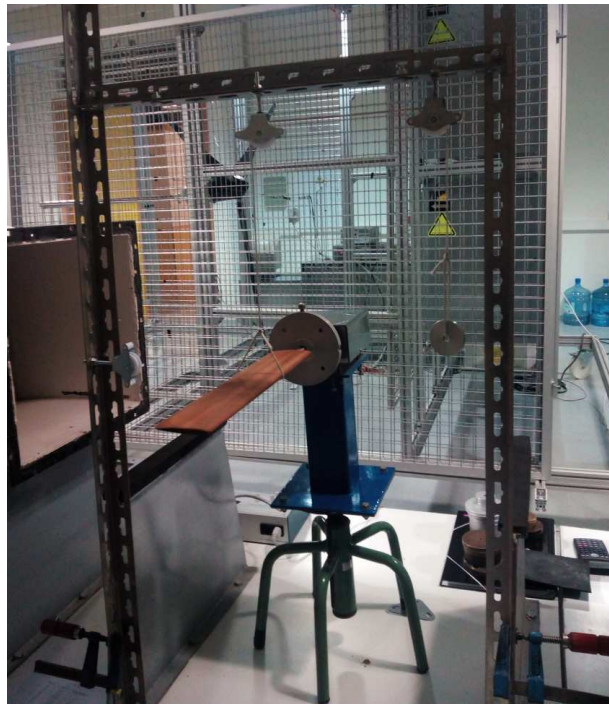


Figura 3.13 Montaje inicial para el ensayo de sustentación

Finalmente utilizamos una sola roldana, ya que la segunda introducía un error muy grande en las medidas leídas por la balanza.

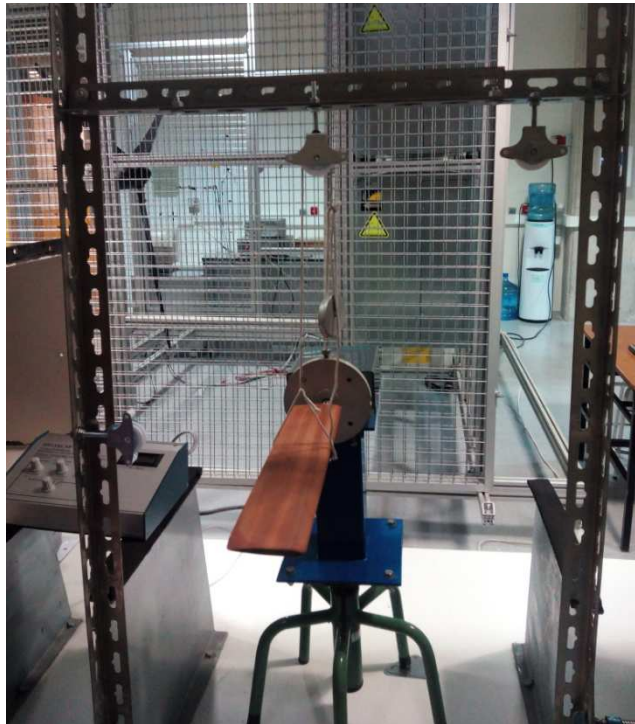


Figura 3.14 Montaje final para el ensayo de sustentación

Los datos que se obtuvieron, utilizando el juego de pesos cuyo valor viene indicado en N, son:

Peso (N)	Lectura Balanza (N)	Lectura Balanza (N) - Ajustada
0	-1,24	0
0,5	-0,78	0,46
0,7	-0,66	0,58
0,9	-0,44	0,8
1,1	-0,28	0,96
1,3	-0,14	1,1
1,8	0,29	1,53
2,3	0,85	2,09
2,8	1,4	2,64
3,3	1,6	2,84
3,8	2,22	3,46
4,3	2,30	3,54
4,8	2,92	4,16

Tabla 3.7 Resultados del primer ensayo de la sustentación

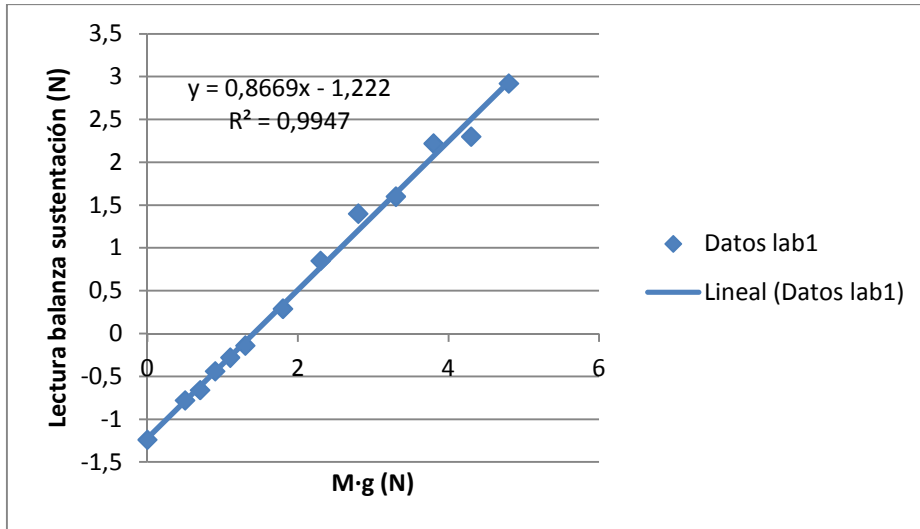


Figura 3.15 Ensayo sustentación 1

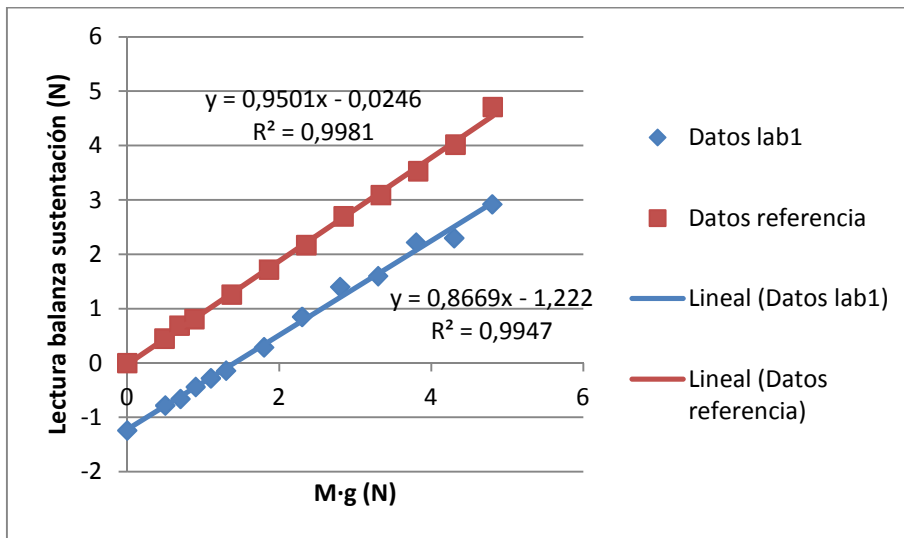


Figura 3.16 Ensayo sustentación 1 frente al ensayo de referencia

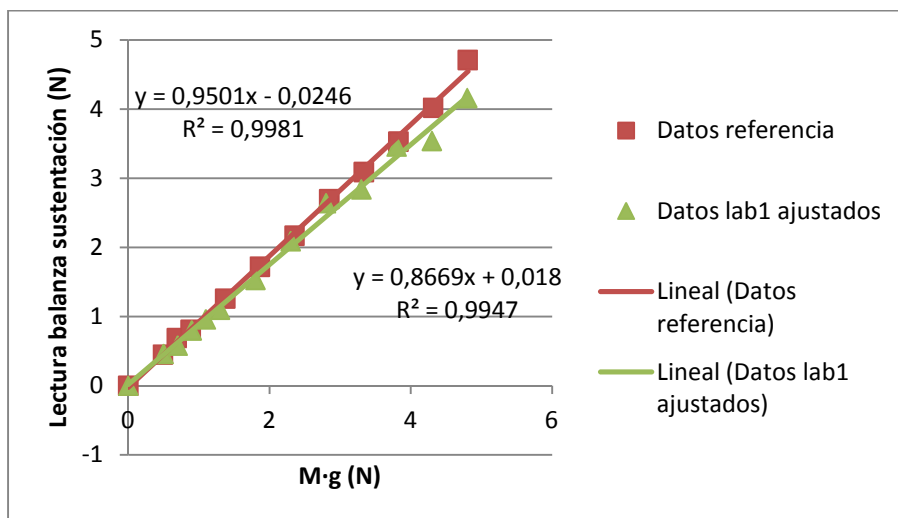


Figura 3.17 Ensayo sustentación 1 ajustado frente al ensayo de referencia

La comparación entre la curva de nuestro ensayo y la del informe de referencia como se aprecia en la figura 3.17 es buena, por lo que podemos concluir que la calibración realizada es válida.

Calibración para la fuerza de arrastre

En este caso los datos se han obtenido utilizando el juego de pesos cuyo valor está indicado en kilogramos. Para obtener el peso de los mismos hemos utilizado $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. Y para la realización del ensayo vamos a utilizar la roldana lateral.



Figura 3.18 Montaje para el ensayo de arrastre

Los datos obtenidos son los siguientes:

Masa (gr)	Peso (N)	Lectura Balanza (N)	Lectura Balanza (N) - Ajustada
0	0	0,72	0
700	6,867	7,2	6,48
1200	11,772	11,69	10,97
1500	14,715	16,89	16,17
2000	19,620	18,54	17,82
2500	24,525	22,28	21,56
3000	29,430	27,14	26,42
3500	34,335	34,21	33,49
4210	41,300	40,32	39,6

Tabla 3.8 Resultados del primer ensayo del arrastre

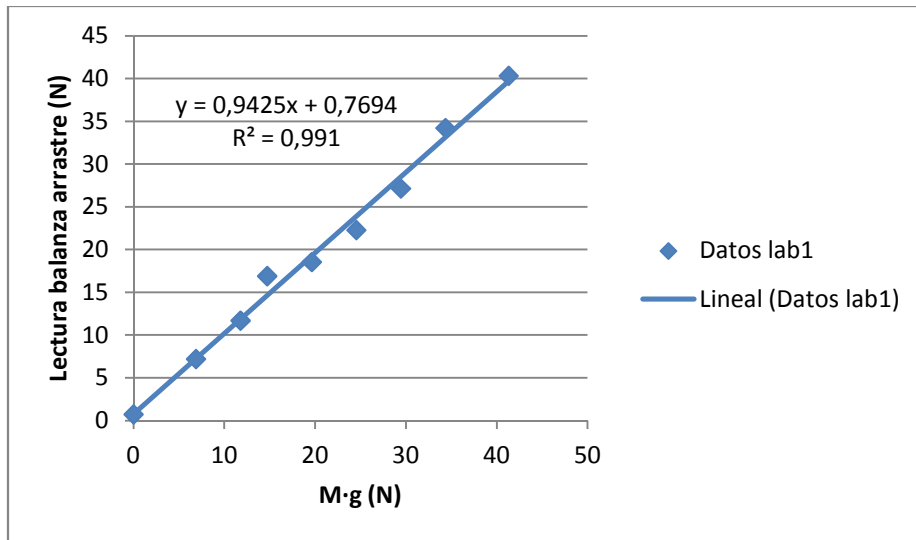


Figura 3.19 Ensayo arrastre 1

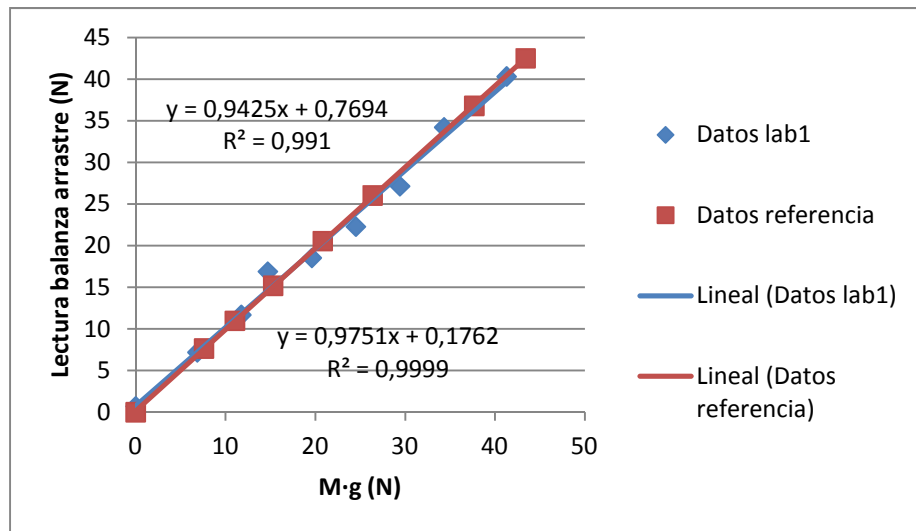


Figura 3.20 Ensayo arrastre 1 frente al ensayo de referencia

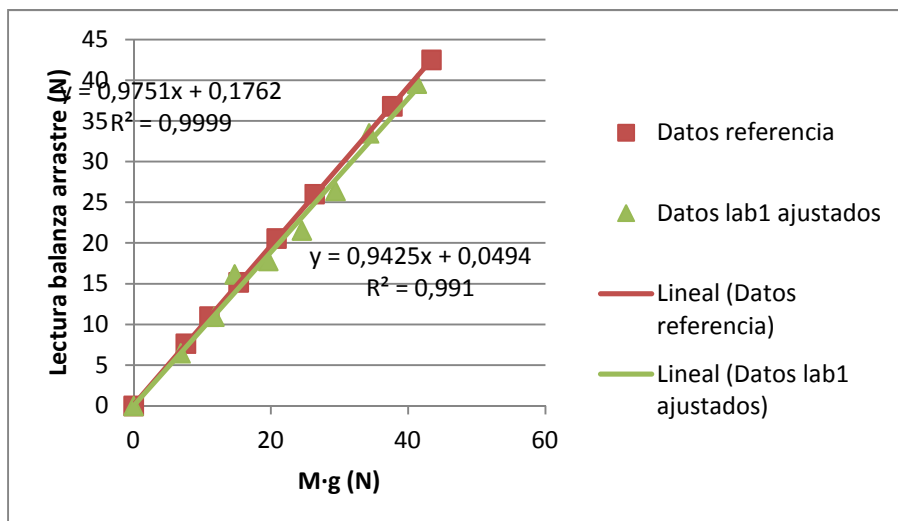


Figura 3.21 Ensayo arrastre 1 ajustado frente al ensayo de referencia

Como podemos comprobar en la figura 3.21 algunos resultados se salen de nuestra recta de ajuste y esto es debido a que la balanza no estaba fijada a la mesa de ensayos. Pero la convergencia entre ambas rectas de ajuste es evidente, por lo que concluimos que la correlación realizada es correcta.

3.3.2 Segunda prueba de calibración de la balanza aerodinámica

Calibración para la fuerza de sustentación

Tras analizar los datos de la calibración de sustentación de la primera prueba expuestos en la tabla 3.7, concluimos que el ensayo de sustentación debe ser repetido. Volvemos a realizar dicho ensayo para obtener una recta de ajuste más precisa. Para ello la medida la realizaremos al 33% de la cuerda que es donde está colocada la varilla interior del perfil, que será la parte del mismo que soportará las fuerzas que sobre él se produzcan. El ensayo de arrastre no se repite porque esta nueva consideración no afecta al procedimiento seguido en la prueba anterior.



Figura 3.22 Pesas colocada a 0.33c

Los datos del nuevo ensayo son:

Peso (N)	Lectura Balanza (N)	Lectura Balanza (N) - Ajustada
0	-0,46	0
0,2	-0,25	0,21
0,4	-0,06	0,4
0,6	0,08	0,54
0,8	0,22	0,68
1,3	0,8	1,26

1,8	1,14	1,6
2,3	1,68	2,14
2,8	2,11	2,57
3,3	2,52	2,98
3,8	3,17	3,63
4,3	3,45	3,91
4,8	3,75	4,21

Tabla 3.9 Resultados del segundo ensayo de la sustentación

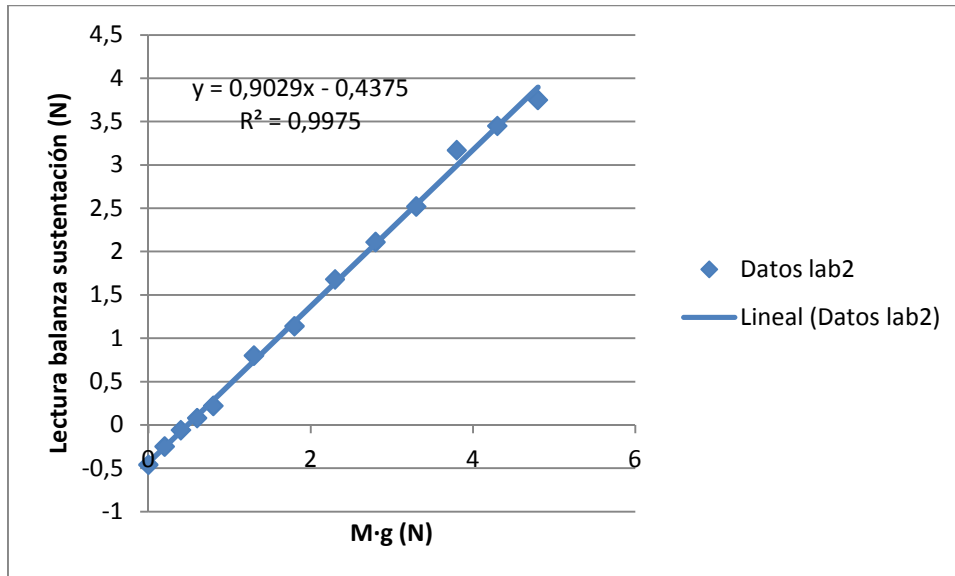


Figura 3.23 Ensayo sustentación 2

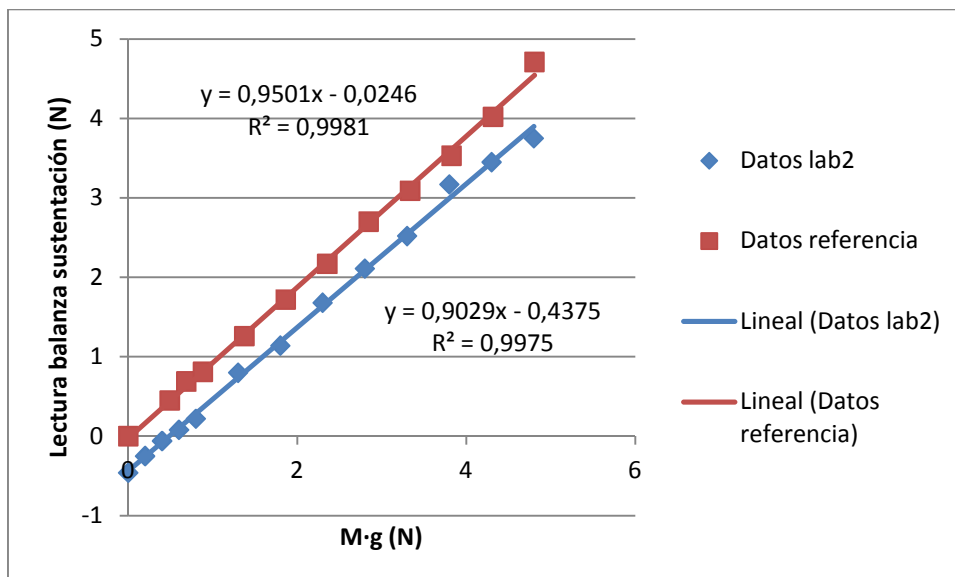


Figura 3.24 Ensayo sustentación 2 frente al ensayo de referencia

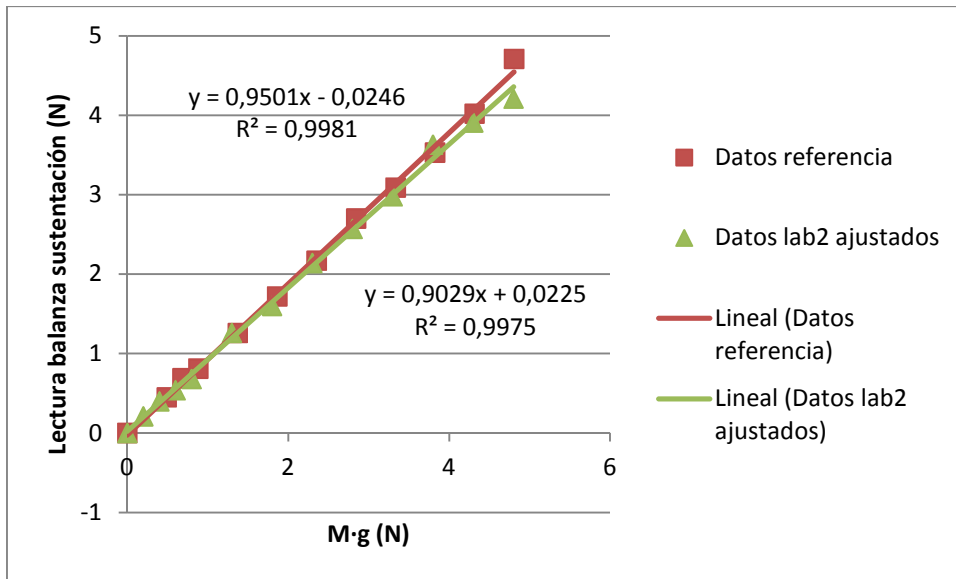


Figura 3.25 Ensayo sustentación 2 ajustado frente al ensayo de referencia

Observamos en la figura 3.25 cómo esta nueva recta de ajuste de los datos obtenidos se ajusta más a la de los datos de referencia.

Ahora en la figura 3.26 comparamos las rectas de ajuste de los dos ensayos realizados para la fuerza de sustentación y comprobamos como son prácticamente idénticas. Por lo que podemos afirmar que hemos mejorado el ensayo realizado en la primera prueba para la sustentación.

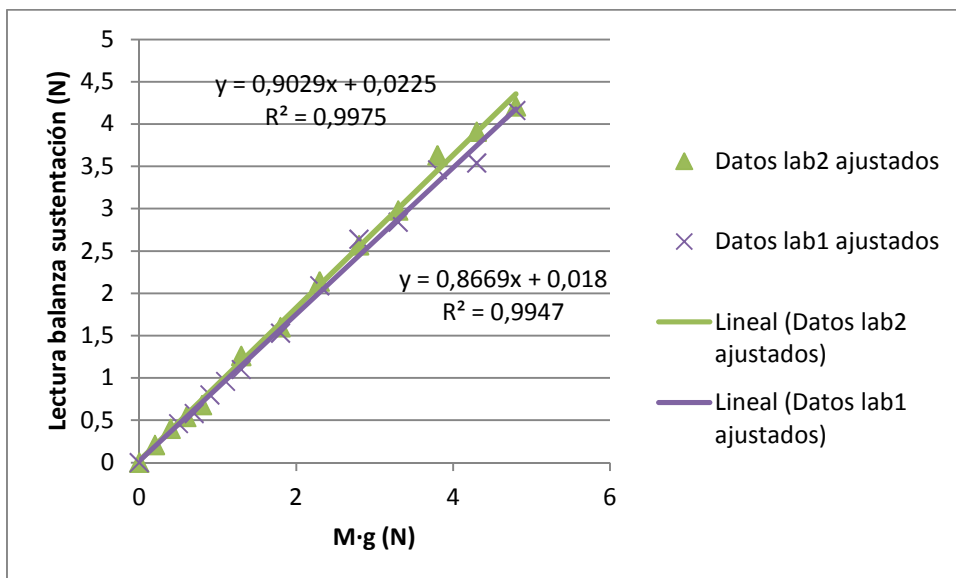


Figura 3.26 Ensayo sustentación 1 ajustado frente al ensayo sustentación 2 ajustado

3.3.3 Tercera prueba de calibración de la balanza aerodinámica

Para una mayor exactitud en la calibración de la balanza, se introducen modificaciones en el procedimiento seguido en las dos pruebas anteriores.

En esta nueva prueba la calibración se va a realizar sobre una varilla, en vez de sobre el perfil. De este modo nos aseguramos que el cabo, sobre el que colgamos el peso calibrado, está tirando exactamente del punto donde se va a producir la fuerza. Y de este modo, no tenemos dudas de que el cabo se mueva del punto en el que ha sido colocado durante la transición de la toma del dato como ocurría en las pruebas anteriores.

Además hemos utilizado una báscula de pesaje, para obtener la medición exacta de los dos juegos de pesos disponibles.



Figura 3.27 Máquinas de pesaje

Hemos utilizado la segunda de la empresa Acculab, que es la que se ajusta al rango de nuestros pesos. Esta báscula ofrece una desviación de 0.01 g y admite piezas de hasta 2200 g.

Los resultados del pesaje son los siguientes:

- Juego de pesas indicado en Newtons (N)

Pesa (N)	Pesada 1 (gr)	Pesada 2 (gr)	Pesada 3 (gr)	Pesada 4 (gr)	Pesada 5 (gr)	Media (gr)
5	510,600	510,610	510,620	510,600	510,600	510,606
5'	510,390	510,390	510,390	510,390	510,390	510,390
2	204,180	204,180	204,180	204,180	204,170	204,178
2'	203,620	203,620	203,620	203,620	203,630	203,622
1	101,410	101,420	101,410	101,410	101,400	101,410
1'	101,050	101,060	101,050	101,060	101,060	101,056
0,3	30,440	30,450	30,440	30,440	30,440	30,442
0,3'	30,440	30,430	30,430	30,440	30,440	30,436
0,3''	30,480	30,480	30,480	30,480	30,480	30,480
0,2	20,500	20,500	20,510	20,480	20,500	20,498
0,2'	20,410	20,410	20,410	20,410	20,420	20,412

Tabla 3.10 Pesadas del juego de pesas en Newtons

- Juego de pesas indicado en kilogramos (kg)

Pesa (gr)	Pesada 1 (gr)	Pesada 2 (gr)	Pesada 3 (gr)	Pesada 4 (gr)	Pesada 5 (gr)	Media (gr)
500	565,670	565,700	565,690	565,690	565,680	554,738
566	581,230	581,240	581,200	581,160	581,210	578,673
1100	1154,810	1154,820	1154,820	1154,790	1154,800	1145,673
1210	1212,840	1212,790	1212,800	1212,780	1212,800	1212,335

Tabla 3.11 Pesadas del juego de pesas en kilogramos

Para esta tercera prueba, en la que hemos repetido los ensayos de calibración de la sustentación y el arrastre, hemos conseguido ajustar el cero de ambas fuerzas por lo que no necesitaremos ajustar las lecturas obtenida. Por lo tanto al ajustar la distribución de puntos con una recta, forzaremos a que esta pase por el origen de los ejes del sistema de referencia utilizado. De las ecuaciones que obtenemos de ajustar la distribución de puntos de los ensayos de arrastre y sustentación de esta tercera prueba, obtendremos los valores reales de estas fuerzas una vez que realizamos los ensayos correspondientes.

Calibración para la fuerza de sustentación

Los datos en este tercer ensayo de sustentación son los siguientes,

Número	Pesas utilizadas (N)	Peso total (gr)	Peso total (N)	Lectura 1 (N)	Lectura 2 (N)	Lectura 3 (N)	Media (N)
1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,2'	20,412	0,200	0,170	0,160	0,170	0,167
3	0,2'+0,2	40,910	0,401	0,340	0,350	0,330	0,340
4	0,3+0,3'	60,878	0,597	0,520	0,510	0,510	0,513
5	0,2+0,3+0,3'	81,376	0,798	0,740	0,720	0,710	0,723
6	1+0,3	131,852	1,293	1,150	1,160	1,170	1,160
7	1+0,2+0,3+0,3'	182,786	1,793	1,590	1,580	1,600	1,590
8	2+0,3	234,620	2,302	1,990	1,990	2,000	1,993
9	2+0,2+0,3+0,3'	285,554	2,801	2,430	2,390	2,420	2,413
10	2+1+0,3	336,030	3,296	2,850	2,860	2,850	2,853
11	2+1+0,2+0,3+0,3'	386,964	3,796	3,260	3,240	3,250	3,250
12	2+2'+0,3	438,242	4,299	3,790	3,820	3,800	3,803
13	2+2'+0,2+0,3+0,3'	489,176	4,799	4,370	4,350	4,340	4,353

Tabla 3.12 Resultados del tercer ensayo de la sustentación

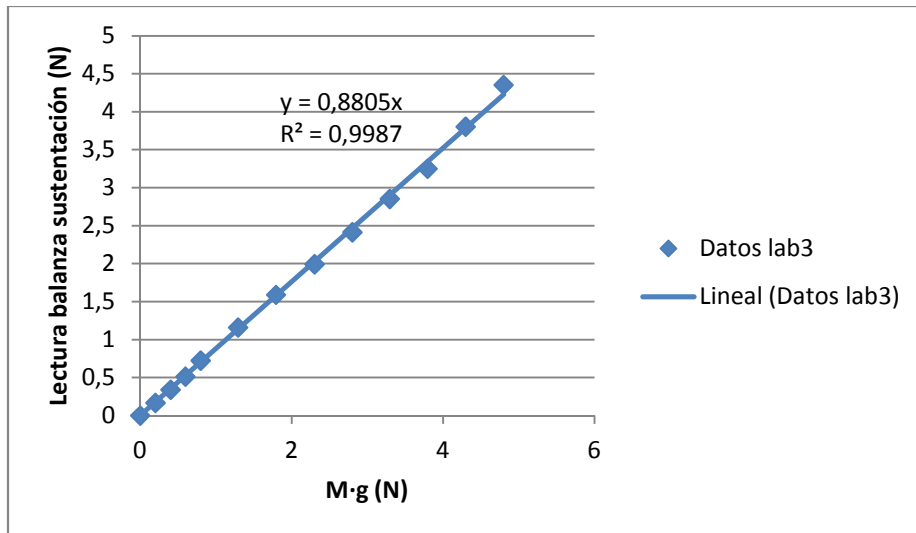


Figura 3.28 Ensayo sustentación 3

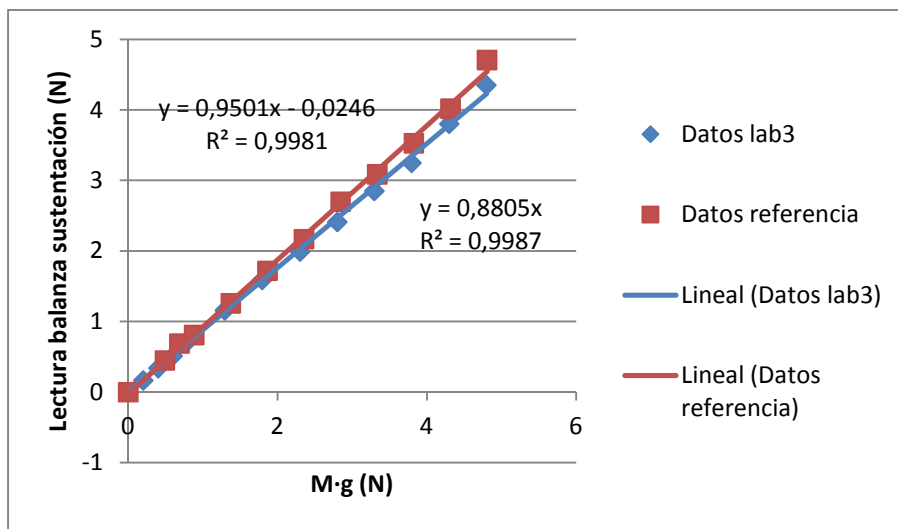


Figura 3.29 Ensayo sustentación 3 frente al ensayo de referencia

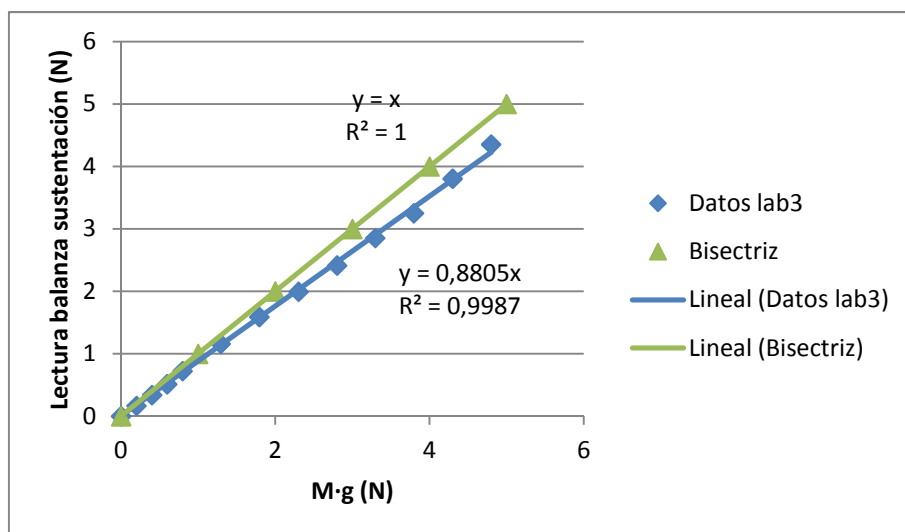


Figura 3.30 Ensayo sustentación 3 frente a la bisectriz

En la figura 3.29 observamos como la recta obtenida es muy parecida a la del ensayo de referencia y el ajuste, indicado por R cuadrado, superior al de las dos pruebas anteriores.

En la figura 3.30 comparamos los resultados con la bisectriz, recta que deberíamos obtener en el caso ideal, y vemos como para valores pequeños los resultados ofrecidos por la balanza se ajustan muy bien y como esta va perdiendo precisión a medida que aumentamos la fuerza generada. Dado que en las medidas de fuerzas aerodinámicas no se va a exceder el rango de valores especificado en la figura 3.30, podemos afirmar que la recta de ajuste obtenida de la distribución de puntos denominada "Datos lab3" de la figura 3.30 describe perfectamente el comportamiento de la balanza aerodinámica para la fuerza de sustentación y será la que finalmente utilizemos.

Calibración para la fuerza de arrastre

Los datos para la segunda prueba de arrastre son los siguientes,

Nº	Pesas utilizadas	Peso total (gr)	Peso total (N)	Lectura 1 (N)	Lectura 2 (N)	Lectura 3 (N)	Media (N)
1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	500 gr + 2 N	758,916	7,445	6,880	6,890	6,880	6,883
3	500 gr + 566 gr	1133,412	11,119	10,420	10,400	10,390	10,403
4	1100 gr + 500 gr	1700,412	16,681	15,730	15,740	15,760	15,743
5	1100 gr + 566gr + 2N	1904,590	18,684	17,760	17,740	17,750	17,750
6	1100 gr + 566gr + 500 gr + 2N	2483,263	24,361	22,880	22,910	22,900	22,897
7	1210 gr + 1100 gr + 566 gr	2936,682	28,809	26,510	26,540	26,520	26,523
8	1210 gr + 1100 gr + 566 gr + 500 gr	3491,420	34,251	31,700	31,690	31,720	31,703
9	1210 gr + 1100 gr + 566 gr + 500 gr + 5 N + 2 N	4206,204	41,263	37,880	37,910	37,850	37,880

Tabla 3.13 Resultados del segundo ensayo del arrastre

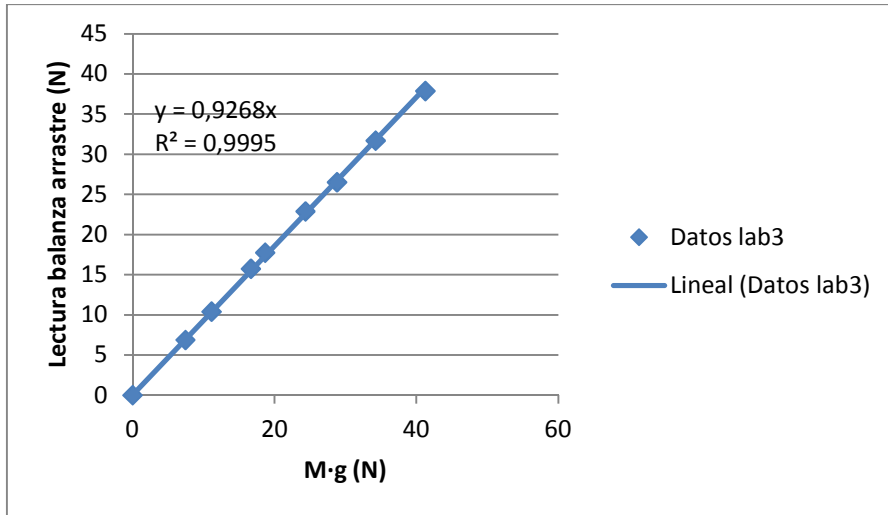


Figura 3.31 Ensayo arrastre 2

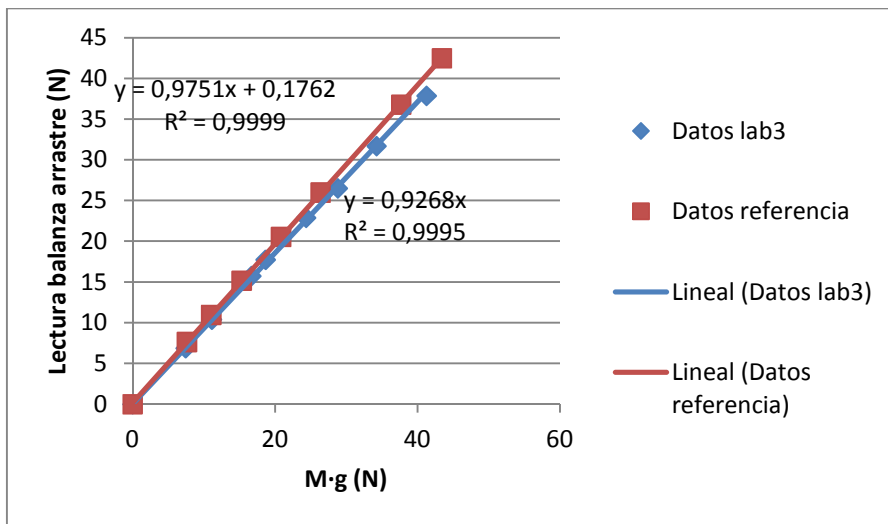


Figura 3.32 Ensayo arrastre 2 frente al ensayo de referencia

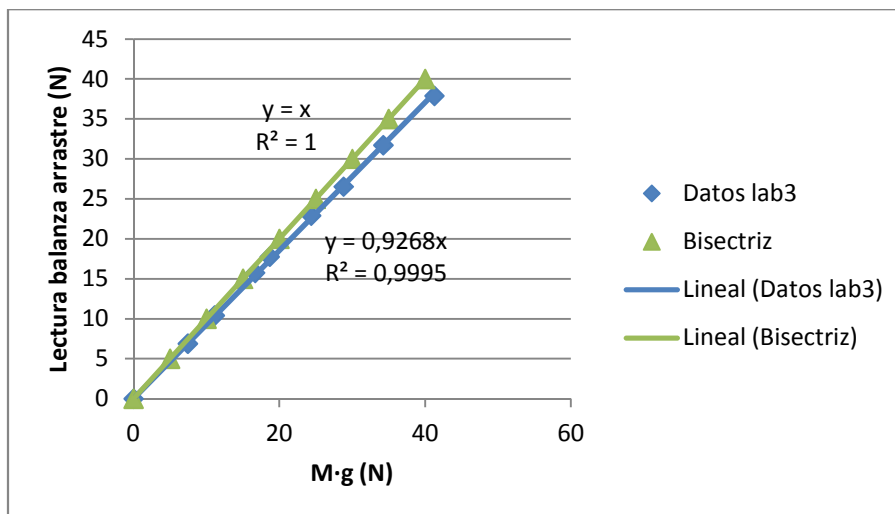


Figura 3.33 Ensayo arrastre 2 frente a la bisectriz

Llegamos a unas conclusiones prácticamente idénticas a las del ensayo de sustentación anterior. Nuestros datos son muy parecidos a los de referencia como se ve reflejado en la figura 3.32.

En la figura 3.33 los comparamos con la bisectriz y volvemos a observar como para valores altos las rectas tienen una tendencia divergente. Pero dado que en los ensayos de fuerzas aerodinámicas apenas se superaran valores de 5 N, podemos afirmar que la recta de ajuste que describe la distribución de puntos "Datos lab3" de la figura 3.33 representa perfectamente el comportamiento de la balanza aerodinámica para la fuerza de arrastre y será la que finalmente utilizemos.

3.4 Incertidumbre en las medidas

3.4.1 Introducción

Una medida resulta completa solo cuando es acompañada de una información cuantitativa de su incertidumbre. La incertidumbre debe ser conocida para decidir si el resultado es adecuado al propósito que se busca y para cerciorarse de si es consistente con otros resultados similares.

La normativa de referencia sobre el procedimiento de cálculo de la incertidumbre en la medida es la ISO/TAG 4/WG 3 "Guide to the expressions of uncertainty in measurement" (GUM), publicada en 1993 y revisada en 1995 (ISO, 1995). El objetivo general de esta norma es establecer las reglas generales para la evaluación y la expresión de la incertidumbre en la medida.

A continuación se definen los términos de incertidumbre y error experimental, se plantea la teoría analítica de errores y posteriormente se exponen los pasos generales a seguir en el cálculo y propagación de la incertidumbre en las medidas experimentales, donde se define con mayor amplitud y detalle en el PFC de CANO-CERÓN & PÉREZ-GARCÍA, J. (2002).

3.4.2 Error experimental. Definición de términos

El error de medida (error absoluto de medida), es la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero de la variable a medir. El "error relativo", es la relación entre el error de medida y el valor verdadero de la variable a medir.

Los errores pueden ser errores aleatorios o sistemáticos. El "error aleatorio" se obtiene restándole a una medida determinada, la media de un número infinito de mediciones realizadas bajo condiciones de repetibilidad. La desviación estándar sobre la media es una forma de expresar el error aleatorio. Como no se puede efectuar un número infinito de medidas, solamente es posible hacer una estimación del error aleatorio.

El "error sistemático" es la diferencia entre el valor medio de un número infinito de medidas realizadas bajo condiciones de repetibilidad y el valor real o verdadero de la variable medida. Puede ser difícil estimarlo dado que el valor verdadero es generalmente desconocido, se puede obtener como el error menos el error aleatorio.. La compensación del error sistemático

en una medición se realiza a partir de la corrección del resultado con un valor obtenido mediante un ensayo de calibración, por tanto, puede ser minimizado mediante un procedimiento de calibración adecuado.

Se denomina "Incertidumbre combinada" cuando el resultado de una medición se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes. Es la desviación típica estimada asociada a cada una de las varianzas de las variables medidas, evaluadas según corresponda, utilizando el cálculo de propagación de la incertidumbre.

Se denomina "incertidumbre expandida" al producto de multiplicar la incertidumbre combinada por un factor de cobertura que depende del nivel de confianza requerido para el intervalo de incertidumbre. Puede variar entre $1 \div 3$, para intervalos de confianza entre el 50% \div 99% respectivamente.

La incertidumbre puede ser debida a tres factores son: la calibración del instrumento de medida, el procedimiento de adquisición de datos y el procesado de estos.

3.4.3 Expresión de la incertidumbre de medida

En los certificados de calibración, el resultado completo de la medición debe expresarse de la forma $(y \pm U)$ con una nota aclaratoria de la siguiente forma: "La incertidumbre expandida de medida se ha efectuado multiplicando la incertidumbre típica de medida por el factor de cobertura $k = 2$ que para una distribución normal, corresponde a un intervalo de confianza del 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA-4/02.

Sin embargo cuando se haya utilizado un procedimiento relacionado con los grados efectivos de libertad la nota ha de ser de la siguiente manera: "La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medida por el factor de cobertura $k = XX$ que, para una distribución T de Student con $v_{ef} = YY$ grados efectivos de libertad, corresponde a un intervalo de confianza del 95%. La incertidumbre típica de medición se ha determinado conforme al documento EA-4/02".

El valor numérico de la incertidumbre debe expresarse, como máximo, con dos cifras significativas. En general, el valor numérico del resultado de la medición debe redondearse en su expresión final a la menor cifra significativa en el valor de la incertidumbre expandida asignada al resultado de la medición. Para el proceso de redondeo, deben aplicarse las normas habituales para el redondeo de cifras. Sin embargo, si el redondeo reduce el valor numérico de la incertidumbre de medida en más de un 5%, debe utilizarse el valor redondeado hacia arriba.

3.4.4 Procedimiento general para el cálculo de la incertidumbre en las medidas

A continuación se enumeran una serie de puntos ordenados para la aplicación práctica del cálculo de incertidumbres:

a) Expresar en términos matemáticos la dependencia del mensurando (magnitud de salida) "Y" respecto de las magnitudes de entrada " X_i ". Si se trata de una comparación directa de dos patrones, la ecuación puede resultar muy simple, por ejemplo: $Y = X_1 + X_2$

- b) Identificar y aplicar todas las correcciones significativas
- c) Relacionar todas las fuentes de incertidumbre en la forma de un análisis de incertidumbres descrita anteriormente
- d) Calcular la incertidumbre típica (del valor medio) para magnitudes medidas reiteradamente conforme se ha detallado anteriormente
- e) Para valores únicos, por ejemplo, valores resultantes de mediciones previas, valores de corrección, valores tomados de la literatura técnica,... adoptar la incertidumbre típica cuando se conozca la misma o pueda calcularse según lo explicado en puntos anteriores. Prestar atención a la representación de la incertidumbre utilizada. Si no se disponen de datos de los que se puedan derivar la incertidumbre típica, hay que estimar el valor basándose en la experiencia científica
- f) Para magnitudes de entrada para las que se conoce o puede suponerse una distribución de probabilidad, calcular el valor esperado y la incertidumbre típica conforme a lo comentado en puntos anteriores. Si sólo se conoce o se puede estimar los límites superior e inferior, calcular la incertidumbre típica de acuerdo con el método correspondiente explicado en puntos anteriores
- g) Calcular la magnitud de entrada, la contribución a la incertidumbre asociada a la estimación de salida resultante de la estimación de entrada aplicando las ecuaciones correspondientes a magnitudes no correlacionadas, sumando los cuadrados para obtener el cuadrado de la incertidumbre típica del mensurando. Si se sabe que las magnitudes están correlacionadas, aplicar el método destinado a ellas explicado anteriormente
- h) Calcular la incertidumbre expandida, multiplicando la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida por el factor de cobertura "k" elegido
- i) Informar del resultado de la medición, indicando el estimado del mensurando, la incertidumbre expandida asociada y el factor de cobertura en el certificado de calibración según se indica en puntos anteriores

3.4.5 Cálculo de la propagación de la incertidumbre de las medidas en el resultado

Los pasos a seguir de una forma mucho más básica y general de forma resumida para la determinación de la incertidumbre de un resultado son los siguientes:

- 1) Determinación del intervalo de incertidumbre de cada una de las medidas que afectan al resultado
- 2) Establecer el límite de confianza de cada medida
- 3) Analizar la propagación de la incertidumbre en el cálculo del resultado

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo de propagación del error aplicado a la determinación del caudal de aire en una instalación a partir de la medida de la velocidad.

La incertidumbre de un resultado $R = R(x_1, x_2, \dots)$ que depende de una serie de medidas es,

$$\begin{aligned} \partial R_i &= \frac{\partial R}{\partial x_i} \partial x_i \\ \frac{\partial R}{R} &= \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \partial x_i = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{x_i} \\ u_{Ri} &= \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \\ u_R &= \pm \left[\sum (u_{Ri})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

La "Incertidumbre típica de medida", es el valor estadístico que un error puede asumir para cualquier medida dada, es decir, el margen de duda cuantificado de la validez de un resultado que en general puede depender de diferentes variables medidas. Se suele expresar como un intervalo continuo, generalmente simétrico, en el que con un alto índice de probabilidad se encontrará el valor verdadero del resultado de una medida.

La incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre típica del resultado por un factor de cobertura, "k" entre 1 y 3 dependiendo del intervalo de confianza elegido.

En la mayoría de aplicaciones en ingeniería se asume tener una distribución del error gaussiana, el 95% de intervalo de confianza es normalmente requerido y por lo que el factor de cobertura es $k = 2$. La incertidumbre total expandida es entonces:

$$u_R = \pm 2 \left[\sum (u_{Ri})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Existen dos formas de calcular la incertidumbre, una es colocando las incertidumbres típicas en tanto por ciento.

$$u_R = \pm 2 \left[\sum \left(\frac{i}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial i} \right) u_{Ri} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Otra forma sería colocar las incertidumbres típicas en unidades físicas, en cuyo caso el cálculo sería distinto.

$$u_R = \pm 2 \left[\sum \left(\frac{\partial R}{\partial i} u_{Ri} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

3.4.5.1 Incertidumbre en las medidas de velocidad

Las fuentes de incertidumbre en la medida de la velocidad instantánea mediante el anemómetro de sensor térmico son:

Tubo de Pitot

El error que se comete al medir la velocidad con el tubo del Pitot, viene determinado por las incertidumbres de cada una de las variables por separado, formando en su conjunto la incertidumbre total del tubo de Pitot. El cálculo se puede realizar en los siguientes pasos utilizando las incertidumbres típicas en unidades físicas:

1) Localizar la combinación de las incertidumbres

$$u_U = \pm k \left[\left(\frac{\partial U}{\partial (p_0 - p)} u_{p_0-p} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial T_{atm}} u_{temp} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial p_{atm}} u_{p_{atm}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

2) Determinar el valor característico de cada variable por separado

$$p_0 - p = mbar = 863 Pa \quad p_{atm} = 101080 Pa \quad T_{atm} = 28.7 \text{ }^\circ\text{C} = 301.7 K$$

$$U = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{p_{atm}/R_g T_{atm}}} = 39 \text{ m/s}$$

$$u_{p_0-p} = \pm 0.0613 \text{ mbar} = \pm 6.13 Pa$$

$$u_{temp} = \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$u_{p_{atm}} = \pm 68 Pa$$

3) Determinar las derivadas parciales

$$\frac{\partial U}{\partial (p_0 - p)} = \frac{1}{2} \left(\frac{2(p_0 - p) R_g T_{atm}}{p_{atm}} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{2 R_g T_{atm}}{p_{atm}} = \frac{1}{2} \frac{U}{p_0 - p} = \frac{1}{2} \frac{39}{863} = 0.0226$$

$$\frac{\partial U}{\partial T_{atm}} = \frac{1}{2} \frac{U}{T_{atm}} = \frac{1}{2} \frac{39}{301.7} = 0.0646$$

$$\frac{\partial U}{\partial p_{atm}} = -\frac{1}{2} \frac{U}{p_{atm}} = -\frac{1}{2} \frac{39}{101080} = -0.0002$$

4) Sustituir los valores

$$u_U = \pm k [(0.0226 \cdot 6.13)^2 + (0.0646 \cdot 0.1)^2 + (-0.0002 \cdot 68)^2]^{1/2} = \pm 0.28 \text{ m/s}$$

Utilizando las incertidumbres típicas en tanto por ciento sería,

$$u_U = \pm k \left[\left(\frac{p_0 - p}{U} \frac{\partial U}{\partial (p_0 - p)} u_{p_0-p} \right)^2 + \left(\frac{T_{atm}}{U} \frac{\partial U}{\partial T_{atm}} u_{temp} \right)^2 + \left(\frac{p_{atm}}{U} \frac{\partial U}{\partial p_{atm}} u_{p_{atm}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_U = \pm k \left[\left(\frac{863}{39} 0.0226 \cdot 6.13 \right)^2 + \left(\frac{301.7}{39} 0.0646 \cdot 0.1 \right)^2 + \left(\frac{101080}{39} (-0.0002) \cdot 68 \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= 0.71\%$$

$$\frac{0.71 \cdot 39}{100} \approx 0.28 \text{ m/s}$$

Número de Reynolds

El error que se comete al obtener el número de Reynolds se puede obtener mediante los siguientes cálculos:

$$u_{Re} = \pm k \left[\left(\frac{U}{\rho c} u_\mu \right)^2 + \left(\frac{U\mu}{\rho^2 c} u_\rho \right)^2 + \left(\frac{U\mu}{\rho c} u_c \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_\mu = \pm 1.458 \cdot 10^{-6} \left(\frac{(1.5T^{1/2})(T + 110.4) - T^{1.5}}{(T + 110.4)^2} \right) u_{temp}$$

$$u_\rho = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{R_g T} u_{p_{atm}} \right)^2 + \left(\frac{p_{atm}}{R_g T} u_{temp} \right)^2}$$

Utilizando los datos del apartado anterior, y calculando:

$$u_\mu = \pm 4.72 \cdot 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$u_\rho = \pm 0.1167 \text{ kg/m}^3$$

Para el cálculo de la incertidumbre en las medidas de esta distancia, se ha utilizado un pie de rey, tomando 10 medidas de esta distancia, y calculando la desviación estándar de estas.

$$u_c = \pm 0.1065 \text{ m}$$

sustituyendo y calculando:

$$u_{Re} = \pm 2.55 \cdot 10^{-3}$$

Multimanómetro

El error cometido en la lectura del multimanómetro depende directamente de la precisión en la lectura de la escala, estimándose esta en $\pm 1\text{mm}$. Y como resultado de estas medidas se obtiene la presión dinámica y estática, y la velocidad en la cámara de ensayo.

3.4.5.2 Incertidumbre en las medias de fuerzas aerodinámicas y coeficientes de sustentación y arrastre

Este error no es necesario calcularlo ya que es el propio fabricante el que proporciona este dato por lo que podemos conocer, sin previos cálculos el error que se está cometiendo en las

lecturas de las fuerzas aerodinámicas. La incertidumbre de este aparato es de un 1% según las especificaciones técnicas del aparato.

Para el cálculo de la incertidumbre de C_D y C_L se procede de la siguiente forma:

Cálculo de la incertidumbre de C_L

$$u_{C_L} = \pm k \left[\left(\frac{2}{\rho A U^2} u_L \right)^2 + \left(\frac{2L}{\rho^2 A U^2} u_\rho \right)^2 + \left(\frac{2L}{\rho A^2 U^2} u_A \right)^2 + \left(\frac{4L}{\rho A U^3} u_U \right)^2 \right]^{1/2}$$

Utilizando los términos de los apartados anteriores, y calculando resulta:

$$A = 0.02765 \text{ m}^2 \quad u_L = u_D = \pm 0.05 \quad L = 20 \text{ N} \quad u_l = \pm 0.1247 \text{ m}$$

$$u_A = \pm \sqrt{(lu_c)^2 + (cu_l)^2} = \pm 0.0429$$

$$u_{C_L} = \pm 2.53$$

Análogamente se calcularía la incertidumbre para C_D , a diferencia que en lugar de ser L, es D, y este tiene un valor característico de $D = 3\text{N}$. Luego la incertidumbre cometida al calcular C_D , es:

$$u_{C_D} = \pm 0.38$$

En la siguiente tabla mostramos un resumen de las incertidumbres anteriormente calculadas,

U_U	u_{Re}	$U_{\text{multim.}}$	U_{balanza}	u_{C_L}	U_{C_D}
$\pm 0.28 \text{ m/s}$	$\pm 2.55 \cdot 10^3$	$\pm 1 \text{ mm}$	-	$\pm 2.53 \text{ N}$	$\pm 0.38 \text{ N}$
0.71%	-	-	1%	-	-

Tabla 3.14 Medidas de incertidumbre

Capítulo 4. Impresoras 3D

4.1 Introducción

4.2 Tecnologías empleadas por las impresoras 3D

4.2.1 Tecnología Fused Deposition Modeled - FDM

4.2.1.1 Impresora 3D modelo DIMENSION bst 1200es

4.2.1.2 Impresora 3D modelo Fortus 400mc

4.2.1.2.1 Características del material usado por la máquina de prototipado rápido disponible en Pixel Sistemas S.L.

4.2.2 Tecnología Objet PolyJet

4.2.2.1 Impresora 3D modelo Objet Desktop

4.3 Comparativa de las tecnologías 3D

4.1 Introducción

En el segundo capítulo vimos que teníamos un túnel aerodinámico en aspiración y una instrumentación con la que poder tomar medidas y realizar ensayos en el mismo. En el siguiente capítulo comprobamos que tanto el túnel como la instrumentación para medida de velocidades y fuerzas aerodinámicas se encontraban en condiciones óptimas para su uso. El problema que nos surgió fue que el único perfil aerodinámico disponible, se encontraba muy deteriorado para poder tomar medidas fiables. Por lo que nos vimos obligados a fabricar nuevos perfiles para poder continuar con la realización del trabajo.

El perfil disponible estaba fabricado en madera pero descartamos volver a reproducir los perfiles de este modo, ya que el coste que supone en tiempo es demasiado elevado.

Buscamos modernizar el proceso de obtención de los mismos, así como un modo más ágil de realizarlo. La solución constructiva y de producción más adecuada que encontramos dentro de los recursos de la Universidad Politécnica de Cartagena, fueron las impresoras 3D localizadas en el SAIT. Por lo tanto optamos por la utilización de estas impresoras. Ya que suponen un método de producción rápido, moderno, así como un recurso de fácil acceso al pertenecer a la propia institución en la que se desarrolla el proyecto. Y es que el mundo de la fabricación está incrementando su tendencia hacia soluciones de impresión 3D en su búsqueda por agilizar la comercialización de nuevos productos en un mercado cada vez más competitivo. Ya que solventando los retos de ingeniería en fases tempranas del proceso de desarrollo, es posible ahorrar costes y pasar rápidamente de un estado de concepto a un estado de producto final.

El primer problema que nos encontramos al comenzar a trabajar con las impresoras del SAIT son las dimensiones de las mismas. Estas nos obligan a dividir en partes el perfil que sería adecuado a las dimensiones de nuestro túnel de viento. En principio esto no debe suponer un problema, pero para poder afirmarlo con seguridad contactamos con una empresa externa que nos pueda facilitar el perfil fabricado en una sola pieza. De este modo tendremos dos prototipos fabricados de modo diferente y de su comparación podremos determinar la influencia de obtener el perfil en diferentes partes.

Por lo tanto, a lo largo de este capítulo expondremos las distintas tecnologías e impresoras 3D a las que hemos tenido acceso para en el capítulo 6 poder justificar de modo adecuado las elecciones tomadas.

4.2 Tecnologías empleadas por las impresoras 3D

En el mercado actual podemos encontrar distintos modelos de impresoras 3D. Todas las que vamos a presentar en ese documento emplean la deposición de material fundido capa a capa. Pero aunque todas funcionen básicamente con el mismo principio tecnológico, hay diferencias entre las tecnologías de las diferentes impresoras. Estando cada una de las modificaciones patentada. Por lo que vamos a presentar las distintas tecnologías y las impresoras que utilizan cada una de ellas.

4.2.1 Tecnología Fused Deposition Modeled - FDM

La Deposición de Material Fundido (FDM) consiste en la fabricación de prototipos mediante la extrusión de material termoplástico en estado de semi-fusión a través de una boquilla que deposita capa a capa el modelo pretendido.

Para prototipos tangibles esencialmente funcionales o de montaje. Se obtienen piezas resistentes que pueden ensayarse, mecanizarse, recibir tratamientos posteriores (arenados, deposiciones metálicas,...) y pintarse. Destacamos la flexibilidad de los modelos obtenidos, aunque no de manera multi-direccional.

Los materiales que permite utilizar esta tecnología, y algunas de sus aplicaciones, los presentamos en la siguiente tabla,

MATERIALES	APLICACIONES
ABS (P400)	Prototipos que requieran especificaciones funcionales (clipajes, fijaciones, uniones, montajes...)
ABSi (P500)	Prototipos que requieran soportar impactos
Cera de fundición (ICW06)	Modelos rápidos, baratos y de diseño iterativo
Elastómero (E20)	Prototipos que requieran carácter flexible
Poléster (P1500)	Modelos rápidos, baratos y de diseño iterativo
Polycarbonato	Prototipos que requieran características translúcidas

Tabla 4.1 Materiales disponibles para la tecnología FDM

A modo de resumen presentamos las ventajas e inconvenientes de esta tecnología,

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> • Buena precisión en los modelos • Autonomía de trabajo • Escaso mantenimiento de la máquina • No precisa personal excesivamente cualificado • Alto carácter funcional de las piezas • Elevada flexibilidad de los modelos • Posibilidad de post-acabados 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de emplear soportes en aquellas zonas de pieza que presenten voladizos. Su eliminación puede realizarse de forma mecánica o mediante soluciones especiales (dependiendo de la máquina) • Baja productividad • Lento en piezas voluminosas • Poca consistencia en dirección vertical

Tabla 4.2 Ventajas e inconvenientes de la tecnología FDM

4.2.1.1 Impresora 3D modelo Dimension bst 1200es

Esta impresora disponible en el SAIT trabaja con ABS y ABSplus. El ABSplus es un 40% más fuerte que el ABS estándar y es un material ideal para la creación de prototipos conceptuales.

La combinación entre el ABSplus y la tecnología FDM nos da la habilidad de crear partes reales, directamente de archivos digitales, que son más fuertes, más suaves y con mayor detalle de reproducción. La hoja técnica del material la encontramos en la Figura II.1 del Anexo II.

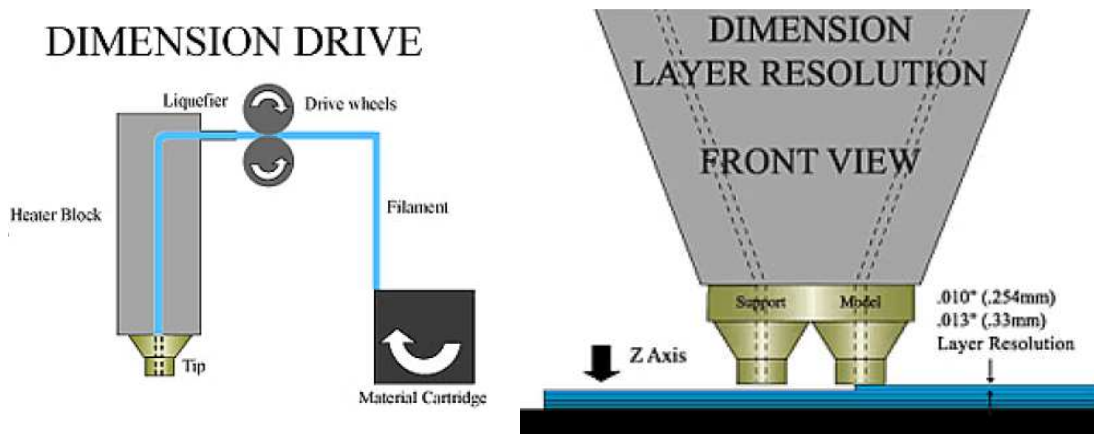


Figura 4.1 Esquema sistema de inyección

4.2.1.2 Impresora 3D modelo Fortus 400mc

Esta es la impresora con la que trabaja la empresa PIXEL SISTEMAS S.L. El material empleado en la fabricación de los prototipos es el ASA, cuyas especificaciones técnicas vienen desarrolladas en la Figura II.2 del Anexo II. La altura de capa empleada por esta impresora es de 0.25 mm.

4.2.2 Tecnología Objet PolyJet

La tecnología PolyJet consiste en la "impresión" de un material foto polímero mediante múltiples boquillas ubicadas en el cabezal. Las boquillas depositan el material en estado líquido sobre la bandeja de construcción con un movimiento similar al de una impresora, en capas de tan sólo 16 micras de grosor. Una vez depositado, una luz ultravioleta solidifica el material. La bandeja de construcción desciende y el proceso se repite.

Para prototipos de gran precisión dimensional, detalles finos y superficies lisas o incluso fabricar paredes de hasta 0.6 mm. Sobre los prototipos obtenidos mediante esta tecnología puede realizarse un acabado superficial de muy alta calidad sin necesidad de imprimaciones ya que es muy fácil de pulir.

Los materiales que permite utilizar esta tecnología, y algunas de sus aplicaciones, los presentamos en la siguiente tabla,

MATERIALES	APLICACIONES
FullCure 720: material transparente	Prototipos que requieran características traslúcidas
FullCure 830 (VeroWhite) FullCure 840 (VeroBlue)	Materiales opacos, en blanco y en azul, con excelentes propiedades mecánicas, que facilitan la visualización de detalles
FullCure 950 (TangoGray) FullCure 970 (TangoBalck)	Materiales flexibles, en gris y en negro, con propiedades mecánicas que simulan el comportamiento de la silicona o la goma. Igual que el resto de los materiales, permiten la reproducción de detalles y texturas.

Tabla 4.3 Materiales disponibles para la tecnología Objet PolyJet

A modo de resumen presentamos las ventajas e inconvenientes de esta tecnología,

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> • Acabado superficial • Buena precisión en los modelos • Autonomía de trabajo • Escaso mantenimiento de máquina • No precisa de personal excesivamente cualificado • Posibilidad de post-acabados de elevada calidad sin necesidad de imprimaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de emplear soportes en aquellas zonas de pieza que presenten voladizos. Su eliminación puede realizarse de forma mecánica o mediante soluciones especiales (dependiendo de la máquina) • No es muy funcional • No puede someterse a tratamiento de temperatura superiores a 45°C

Tabla 4.4 Ventajas e inconvenientes de la tecnología Objet PolyJet

4.2.2.1 Objet Desktop

Esta es la segunda impresora disponible en el SAIT. Es capaz de realizar capas superfina de 16 micras para lograr superficies suaves. Y tiene una precisión de 0.1 a 0.3 mm. Las características del material empleado en la fabricación del prototipo se encuentra en la figura II.3 del Anexo II.

4.3 Comparativa de las distintas tecnologías 3D

En la siguiente tabla mostramos una comparativa de los principales requerimientos de las tecnologías que acabamos de presentar.

REQUERIMIENTOS	TECNOLOGÍA	
	FDM	OBJET POLYJET
Estética	Medio	Alto
Funcionalidad	Alto	Medio
Elasticidad	Alto	Media
Resistencia Mecánica	Alto	Medio
Resistencia Térmica	Medio	Bajo
Tolerancias dimensionales	Medio	Alto
Tiempo mínimo de fabricación	Medio	Alto
Grado de definición	Bajo	Alto

Tabla 4.5 Comparativa de las tecnologías de impresión 3D

Capítulo 5. Perfiles aerodinámicos

5.1 Introducción

5.2 Características de los perfiles aerodinámicos

5.3 Fuerzas aerodinámicas

5.3.1 Fuerzas en perfiles aerodinámicos

5.3.2 Evaluación de las prestaciones de perfiles aerodinámicos

5.4 Clasificación de los distintos perfiles aerodinámicos

5.4.1 Perfiles NACA

5.4.2 NACA 0012

5.1 Introducción

Una vez planteada la necesidad de fabricar perfiles, para poder llevar a cabo diferentes ensayos con el túnel de viento y solucionado el método mediante el que vamos a obtener dichos perfiles, nos queda decidir qué tipo de superficie sustentadora será la más apropiada para llevar a cabo las diferentes pruebas. Una vez seleccionado el perfil, tendremos que determinar las dimensiones del mismo, que deberán ser tal que ocupe toda la sección de ensayos para tener así un flujo bidimensional y poder realizar los ensayos de medida de fuerzas de un modo correcto.

Sobre el perfil que decidamos fabricar se medirán las fuerzas aerodinámicas de sustentación y arrastre, determinando a través de la comparación de las gráficas que estas nos proporcionan con los datos de referencia la calidad de los modelos fabricados mediante la impresora 3D.

Se ha de tener en cuenta que la acción del viento sobre el perfil suele referirse al punto $1/4$ de la cuerda ($c/4$). Y que la actitud del perfil viene definida por el ángulo de ataque α , que es el ángulo formado por la cuerda y la dirección de la velocidad incidente no perturbada.

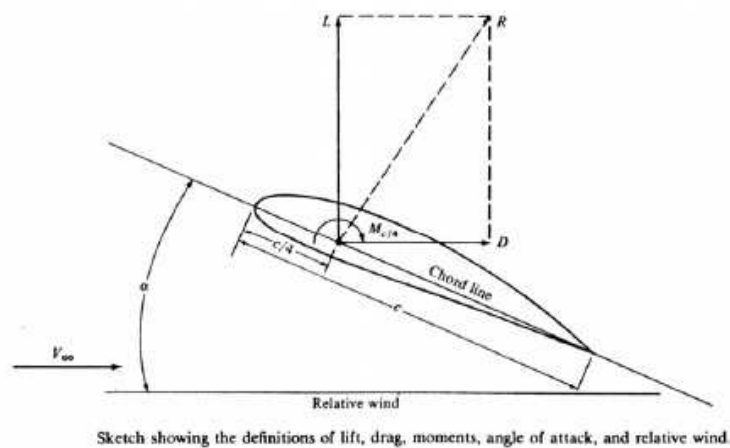


Figura 5.1 Resultante de las fuerzas aerodinámicas sobre un perfil

5.2 Características de los perfiles aerodinámicos

Un perfil aerodinámico es una superficie sustentadora muy eficiente, capaz de generar la fuerza de sustentación necesaria y al mismo tiempo una resistencia aerodinámica pequeña $L \gg D$.

El estudio se centra en perfiles aerodinámicos, siendo la forma y la inclinación del perfil respecto a la dirección del flujo de aire, de gran importancia en la distribución de presiones, dando origen a la sustentación. En la figura 5.2 se definen los elementos de los que consta un perfil aerodinámico y se aclara la nomenclatura relativa a estos.

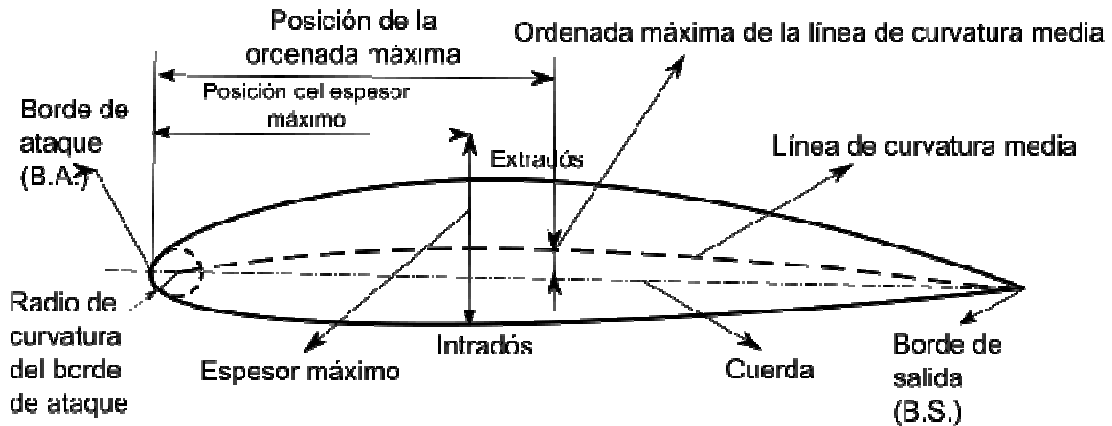


Figura 5.2 Partes de un perfil aerodinámico

- *Borde de ataque.* Es la parte anterior de un perfil
- *Borde de salida o de fuga.* Es la parte posterior del perfil
- *Cuerda.* Es la línea recta que une el borde de ataque (b.a.) con el borde de salida (b.s.). Es una dimensión característica del perfil
- *Línea de curvatura media.* Es una línea equidistante entre el extradós y el intradós. La forma de esta línea es muy importante en las características aerodinámicas del perfil. Si la línea de curvatura media, cae por encima de la cuerda, se dice que la curvatura es positiva, negativa si va por debajo y de doble curvatura si va en un tramo por arriba y en otro por debajo
- *Ordenada máxima de la línea de curvatura media.* Es la máxima distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda; este valor y su posición a lo largo de la cuerda ayuda a definir la forma de la línea de curvatura media. El valor de la ordenada máxima y su posición suelen darse en forma de porcentaje de la cuerda
- *Espesor y distribución del espesor.* Son dos características importantes. El valor del espesor máximo y su posición se expresan en porcentaje de la cuerda. El valor del espesor varía desde un 3 % en los muy delgados, hasta un 24 % en los muy gruesos
- *Radio de curvatura del borde de ataque.* Define la forma del borde de ataque, y es el radio de un círculo tangente al extradós e intradós, y con su centro situado en la línea tangente en el origen a la línea de curvatura media
- *Ángulo de ataque.* Es el que existe entre la cuerda y la dirección de la corriente de aire no perturbada
- *Curvatura media.* Normalmente los perfiles que constituyen el ala suelen ser distintos a lo largo de la envergadura y las cuerdas disminuyen desde la raíz a los extremos; la curvatura media sería aquella que multiplicada por la envergadura da la superficie alar

- *Extradós*. Es la parte superior del perfil (de la cuerda hacia arriba)
- *Intradós*. Es la parte inferior del perfil (de la cuerda hacia abajo)
- *Superficie alar*. Es la superficie de las alas, incluyendo la parte del ala que pueda estar cubierta por el fuselaje o góndolas de los motores, o lo que es lo mismo, como si no existieran estos elementos. En perfiles aerodinámicos es el producto de la cuerda, c , y la envergadura, b . Y es un valor constante que utilizado para adimensionalizar los coeficientes de sustentación y arrastre.

Cálculo de la geometría de perfiles aerodinámicos

Otro aspecto importante a tener en cuenta sobre los perfiles aerodinámicos es su geometría. Esta se puede obtener de distintas maneras.

1) Si se toma como eje x la cuerda del perfil, la geometría se define por las ecuaciones que definen el extradós ($Z_e(x)$) y el intradós ($Z_i(x)$).

2) Otro método alternativo es mediante el uso de dos funciones, la del espesor y la de la curvatura.

- Espesor: $e(x) = Z_e(x) - Z_i(x)$, suele ser pequeño y los perfiles se puede clasificar en función de su valor máximo:
 - o delgados: $\frac{t}{c} < 0.10$
 - o medios: $0.10 < \frac{t}{c} < 0.18$
 - o gruesos: $\frac{t}{c} > 0.18$
- Curvatura: $c(x) = 1/2 [Z_e(x) + Z_i(x)]$. El valor máximo suele ser inferior al 5% de la cuerda.

5.3 Fuerzas aerodinámicas

Las fuerzas aerodinámicas que se generan en el flujo externo pueden ser obtenidas analítica, numérica o experimentalmente.

El cálculo exacto de las fuerzas aerodinámicas que se producen sobre un cuerpo sumergido en una corriente de fluido es solo posible en determinados casos, como por ejemplo en placas planas lisas con ángulo de ataque nulo. Por ello, en la mayor parte de los casos prácticos se recurre a datos experimentales y a coeficientes globales de arrastre o sustentación que permiten estimar el valor aproximado de estas fuerzas de naturaleza aerodinámica. La principal dificultad estriba en la determinación del campo de presiones y velocidades alrededor de un cuerpo de geometría compleja debido al desprendimiento de la capa límite.

En cualquier problema de flujo externo se puede analizar el flujo recíproco siendo los

resultados totalmente extrapolables, es decir, los resultados son idénticos si se tiene un fluido en reposo y el sólido en movimiento que en el caso contrario.

Para la experimentación en flujo externo se suele hacer uso de la técnica del análisis dimensional, con objeto de obtener ecuaciones matemáticas aproximadas y reducir el número de ensayos a realizar. Suponiendo un problema sencillo, las variables que pueden intervenir en el arrastre global sobre un cuerpo (D) son: la velocidad del flujo (U), el tamaño característico del cuerpo (c), la densidad (ρ) y la viscosidad dinámica (μ). Con el análisis dimensional se puede obtener:

$$f(D, U, c, \rho, \mu) = 0$$

$$\varphi\left(\frac{D}{\rho U_{\infty}^2 c^2}, \frac{\mu}{\rho U_{\infty} c}\right) = 0 \quad \frac{D}{\rho U_{\infty}^2 c^2} = \varphi_1\left(\frac{\mu}{\rho U_{\infty} c}\right) = \varphi_1(Re)$$

Entonces obtenemos el arrastre:

$$D = \varphi_1(Re)\rho U_{\infty}^2 c^2 = C_D \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A_c$$

De igual forma se puede obtener otra fuerza aerodinámica utilizando el mismo procedimiento, siendo la diferencia, las variables de las que depende.

En general las fuerzas y momentos que aparecen en cuerpos sometidos a un flujo externo dependen básicamente de la geometría y del ángulo de incidencia del flujo, en general, se pueden obtener las siguientes fuerzas y momentos principales:

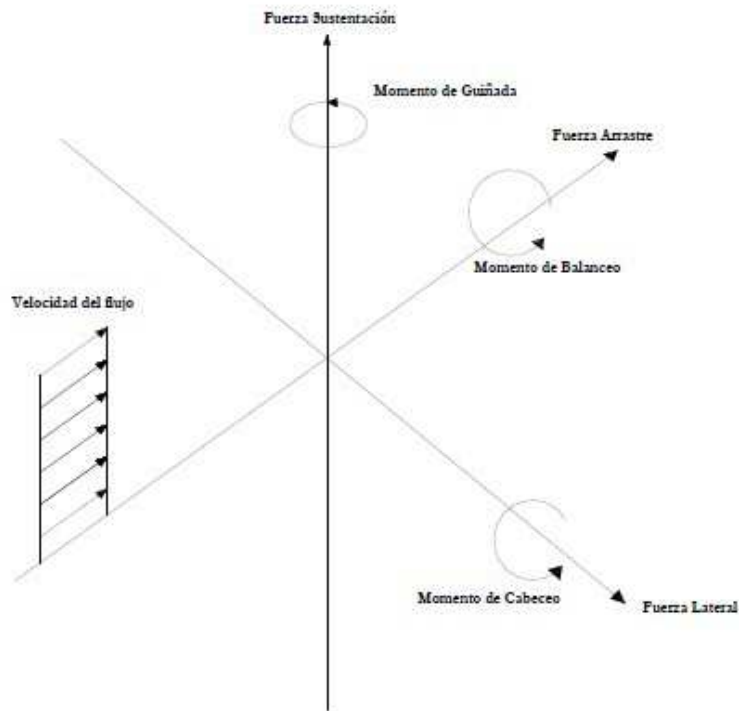


Figura 5.3 Momentos y fuerzas aerodinámicas

El arrastre es la resistencia aerodinámica al avance de un cuerpo sumergido en el seno de un fluido, actúa en la dirección del flujo pero en sentido contrario al movimiento y es suma de una resistencia de fricción debido al gradiente de velocidades en la capa límite, mas una resistencia de presión debido al desprendimiento de la capa límite y al campo de presiones asimétrico entre la parte anterior y posterior del cuerpo.

$$D = D_{fricción} + D_{presión} = \int_A \bar{\tau}' \vec{n} dA + \int_A -p \vec{n} dA$$

La obtención del arrastre mediante la ecuación anterior se utiliza cuando el campo de presiones y velocidades es conocido con precisión. De forma aproximada se puede utilizar la siguiente expresión basada en la obtención de un coeficiente de arrastre global de forma experimental y propio de cada geometría,

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 S$$

siendo C_D , el coeficiente de arrastre global del cuerpo, ρ , la densidad del fluido en Kg/m³, variando con la temperatura y la presión de estática, U , la velocidad del fluido en m/s, dependiendo a su vez de la densidad y de la presión dinámica, y S , el área característica del cuerpo en m², (en cuerpos romos suele ser el área proyectada en la dirección del flujo, mientras que en cuerpos aerodinámicos utilizamos la superficie alar (que hemos definido anteriormente).

La sustentación es una fuerza en dirección perpendicular al flujo, puede ser ascendente o descendente; en función de la geometría del cuerpo y aparece normalmente en cuerpos aerodinámicos. Puede obtenerse de forma aproximada, mediante la siguiente ecuación:

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 S$$

siendo, C_L el coeficiente de sustentación global del cuerpo, adimensional, ρ , la densidad del fluido en Kg./m³, U , la velocidad del flujo no perturbado, m/s y S , es la superficie alar, en m². El coeficiente de sustentación depende en general de la geometría del cuerpo, del ángulo de ataque (α), de la velocidad de rotación del cuerpo (Ω) y de la relación de aspecto entre el espesor del perfil y la cuerda (t/c),

$$C_L = f(\alpha, \Omega, t/c, geometría)$$

Según la Teoría del Flujo potencial para perfiles aerodinámicos:

$$C_L = 2\pi \sin(\alpha + 2t/c) \quad \text{siendo,} \quad S = b \cdot c$$

5.3.1 Fuerzas en perfiles aerodinámicos

Una vez conocidas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo en movimiento sumergido en un fluido, se va a estudiar el flujo alrededor de cuerpos con formas aerodinámicas, ya que estos cuerpos presentan un notable interés desde el punto de vista de su utilización como perfiles

sustentadores en aviación, diseño de hélices de propulsión, aeroturbinas, ventiladores, bombas y turbinas.

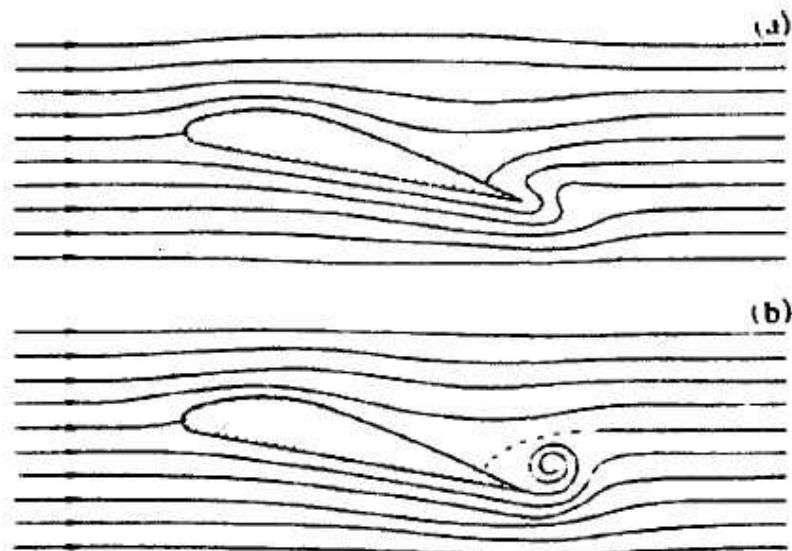
Como ya hemos comentado el estudio se centra en perfiles aerodinámicos, cuyas características generales (de gran importancia para poder comprender como se generan las fuerzas en ellos) han sido presentadas en el apartado 5.2 anterior.

En un principio, al establecerse el movimiento alrededor de un perfil de forma aerodinámica, se forma un movimiento con circulación nula alrededor del perfil; sin embargo si la velocidad incidente sin perturbar incide con un cierto ángulo de ataque por la parte inferior del perfil, aparece un punto de remanso en la parte superior posterior, de manera que la corriente tiene que bordear el borde afilado posterior.

Al bordear esta esquina aparecen velocidades infinitas que no se pueden mantener. Al decelerarse el fluido desde esas velocidades infinitas se origina el desprendimiento de la capa límite, y el efecto de las viscosidad aparece en el seno del fluido bajo la forma de un torbellino desprendido que viaja aguas abajo.

Este proceso de desprendimiento de torbellinos continúa hasta que las condiciones en el perfil sean tales que la corriente abandone su borde posterior de salida suavemente. Esta situación ocurre cuando el punto de remanso se mueve al borde salida. Cuando los torbellinos se han movido aguas abajo suficientemente lejos, lo único que queda es un perfil inmerso en una corriente incidente, alrededor del cual hay una circulación cuya intensidad es justamente la necesaria para que el punto de remanso se haya movido al borde de salida y el fluido abandone suavemente el perfil.

En la figura 5.4 observamos cómo se genera la circulación alrededor de un perfil aerodinámico. Esta tiene el sentido de las agujas del reloj y origina en el perfil una sustentación.



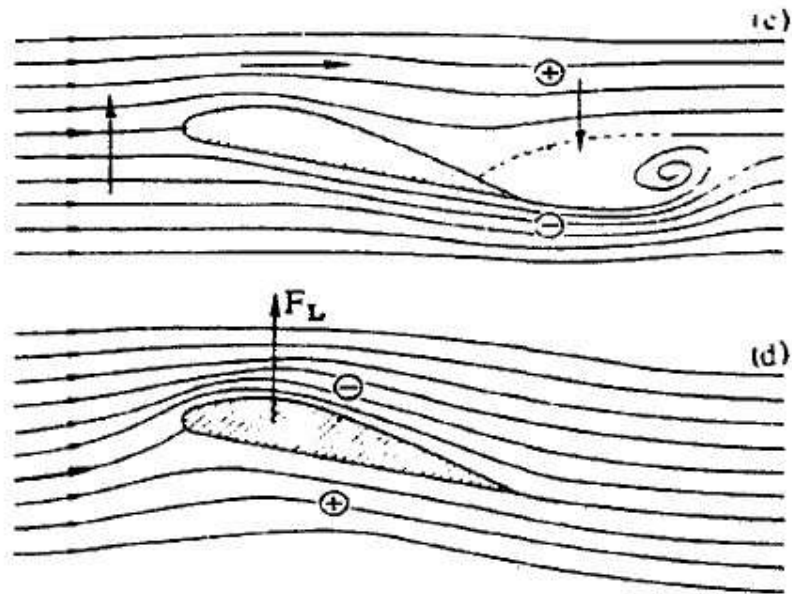


Figura 5.4 Desarrollo del flujo en un perfil aerodinámico

Esta fuerza de sustentación generada en el perfil se obtiene calculando el valor de la circulación alrededor del mismo, con la condición de que el borde de salida tenga velocidad infinita. La fuerza de sustentación de un perfil se obtiene pues a partir de la ecuación de Kutta-Joukowski. Toda esta información relativa a fuerzas en perfiles aerodinámicos la podemos encontrar mejor desarrollada en la referencia CRESPO, A. (2006).

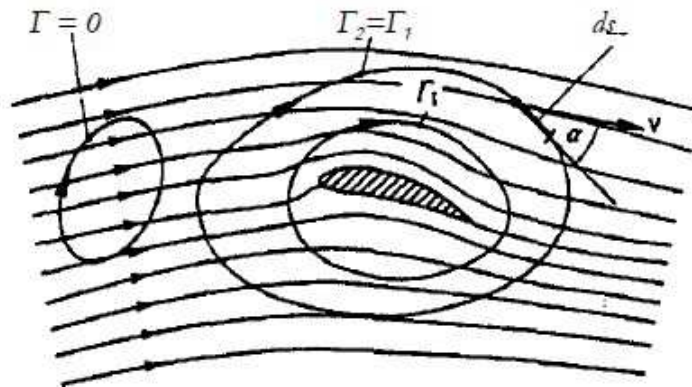


Figura 5.5 Circulación alrededor de un perfil

5.3.2 Evaluación de las prestaciones de perfiles aerodinámicos

Curva polar

Las prestaciones de un perfil aerodinámico se evalúan en base a la capacidad de obtener un alto valor de la relación sustentación/arrastre (L/D), relativo al máximo posible para una forma plana y la capacidad de proporcionar un coeficiente de sustentación máximo ($C_{Lm\acute{a}x}$) lo más alto posible.

A la representación de los coeficientes de sustentación (C_L) frente a los de arraste (C_D) se le denomina curva polar.

El coeficiente de resistencia total (C_D), viene dado por la suma de dos coeficientes de resistencia, uno es el coeficiente de arraste parásita (C_{Dp}) y el segundo es el coeficiente de resistencia inducido por la sustentación (C_{Di}). Por lo que este último existirá siempre y cuando exista sustentación.

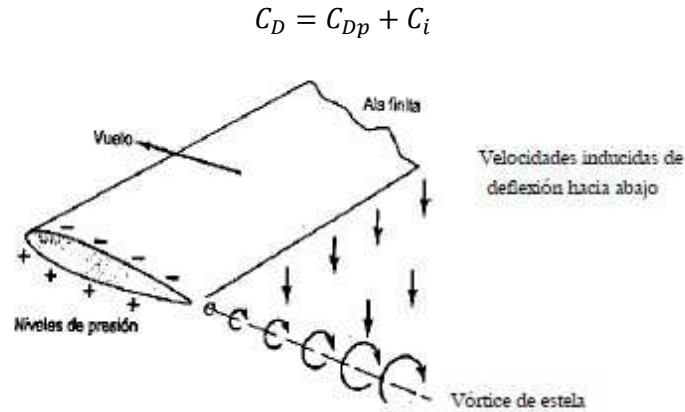


Figura 5.6 Representación del sistema del vórtice de un perfil aerodinámico

El arrastre inducido, viene definido por, $C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi AR}$ siendo, AR, la proporción dimensional efectiva del ala de envergadura finita que se obtiene como, $AR = \frac{b^2}{S}$, siendo, b, la envergadura del perfil y S, la superficie alar.

Este aumento en el arrastre debido a la sustentación, se denomina arrastre inducido

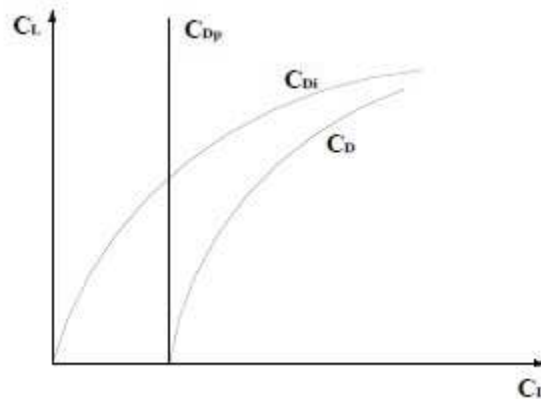


Figura 5.7 Tipos de arrastre para un perfil aerodinámico

Estas dos curvas polares teóricas deben servir como bandas extremas de la curva polar experimental.

Pérdida de sustentación

El punto de "pérdida de sustentación" (bien como ángulo de ataque o bien como velocidad del flujo) es difícil determinar a través de la curva polar. Es adecuado representar la sustentación en función del ángulo de ataque; la sustentación disminuye rápidamente y la eficiencia disminuye debido al desprendimiento de la capa límite en la cara de succión.

Entrada en pérdida

La entrada en pérdida debe ser gradual y el aeroplano debe mantenerse controlable. La entrada en pérdida es causada por la separación del flujo y depende de cómo se desarrolle la separación en función del incremento del ángulo de ataque. Al producirse el desprendimiento la estructura del flujo en la cara superior del perfil se modifica y se producen inestabilidades y vibraciones (estas pueden ser observadas durante los ensayos en el túnel de viento).

5.4 Clasificación de los distintos perfiles aerodinámicos

Como ya comentamos al comienzo de este capítulo, tenemos que seleccionar el perfil que queremos fabricar. Existen numerosas series de perfiles normalizadas, pero de la que encontramos mayor volumen de datos e información con la que posteriormente poder comparar nuestros resultados, es la serie NACA. Por lo que a partir de aquí nos vamos a centrar en esta serie, de la que seleccionaremos el perfil a fabricar.

5.4.1 Perfiles NACA

Los perfiles NACA son una serie de perfiles que reciben su nombre de la institución que los creó, la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), y que se engloban según sus características:

- Four-digit series
- Five-digit series
- Modifications
- 1-series
- 6-series
- 7-series
- 8-series

Nos vamos a centrar en los perfiles de la serie de cuatro dígitos porque son de los que tenemos una bibliografía más extensa a nuestro alcance. Pero si queremos obtener las coordenadas de perfiles de las otras series podemos hacer uso de las bases de datos especificadas en las siguientes referencias, (LEDNICER, 2015) o (SELIG, 2015). O si lo que nos

interesa es entrar en detalle de cualquiera de las otras series podemos utilizar los documentos de la referencia (ABBOT & VON DOENHOFF, 1959) y de (RONCERO & JIMÉNEZ, 2009).

Four-digit series

Estos perfiles, como su propio nombre indica, están descritos por cuatro números y a continuación explicamos que significado tiene cada uno de ellos:

- El primer dígito describe la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda (% c).
- El segundo dígito describe la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque en 1/10 del porcentaje de la cuerda.
- Y los dos últimos dígitos describen el máximo espesor como % de la cuerda.

Los perfiles de esta serie tiene por defecto su valor máximo de espesor en el 30% de la cuerda.

Además podemos encontrar otra diferenciación entre los perfiles de esta serie. Estos pueden clasificarse entre los que tienen curvatura y los que son simétricos. Estos últimos son claramente más sencillos de diseñar y fabricar, por lo que seleccionaremos un perfil de esta categoría. Concretamente el NACA 0012.

5.4.2 NACA 0012

El propósito de preparar correctamente los instrumentos de medida y caracterización, son los experimentos que se van a realizar en el túnel de viento. Para llevar a cabo estos experimentos es necesario elegir previamente el perfil aerodinámico objeto de estudio en los mismos.

Se decide escoger un perfil NACA 0012 por ser de los más documentados y característicos y por tener un modelo en madera a nuestro alcance con el que comparar los resultados del nuevo modelo obtenido. Una vez elegido el tipo de perfil, se describieron las características que debía cumplir para concordar con el tamaño del túnel de viento y los requerimientos de fabricación y posterior manipulación del perfil, no sólo en forma, sino también en tamaño. Las características implícitas son las siguientes:

- 1.- El espesor del perfil debía ser de al menos el 10% de su cuerda, ya que las necesidades constructivas exigen un grosor importante para la correcta manipulación del mismo en la instalación de la sujeción y que facilitará la fabricación del mismo con la impresora 3D.
- 2.- El ángulo de ataque crítico no debía ser menor de 8° , puesto que el rango de datos que se podrían medir sería insuficiente para caracterizar bien el perfil.
- 3.- El ángulo de ataque crítico no debe ser mayor de 20° , pues, al ser el túnel de viento pequeño, la interacción con las paredes sería demasiado grande e imposible de evitar.
- 4.- Por supuesto, el perfil debe caber dentro del túnel de viento de la Universidad.

Para la documentación de los perfiles se examina el libro (ABBOT & VON DOENHOFF, 1959). En él se encuentran documentados los perfiles NACA. Tras inspeccionar las gráficas se corrobora que el NACA 0012 cumple todos los apartados anteriores como se verá a continuación.

El perfil que nos ocupa, según su nomenclatura, implica las siguientes características:

- No tiene curvatura ya que su primera y segunda cifra son cero, es decir, es un perfil simétrico.
- Su espesor máximo es un 12% de la cuerda y está localizado al 30% de la misma.

Como se puede ver en la figura 5.8 el perfil queda completamente definido con estas cuatro cifras

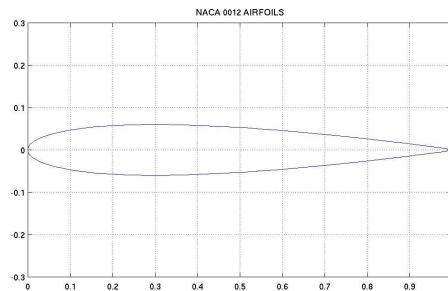


Figura 5.8 Perfil NACA 0012

En la figura 5.9 se puede comprobar que el ángulo de ataque crítico, para números de Reynolds de $3 \cdot 10^6$ a $9 \cdot 10^6$, está en torno a 17° . Para este ángulo, el coeficiente de sustentación disminuye bruscamente haciendo que el perfil deje de mantenerse en el aire. Esta característica cumple con las especificaciones 2 y 3.

La gráfica teóricas del perfil NACA 0012 obtenidas del libro (ABBOT & VON DOENHOFF, 1959) de α frente a C_L es:

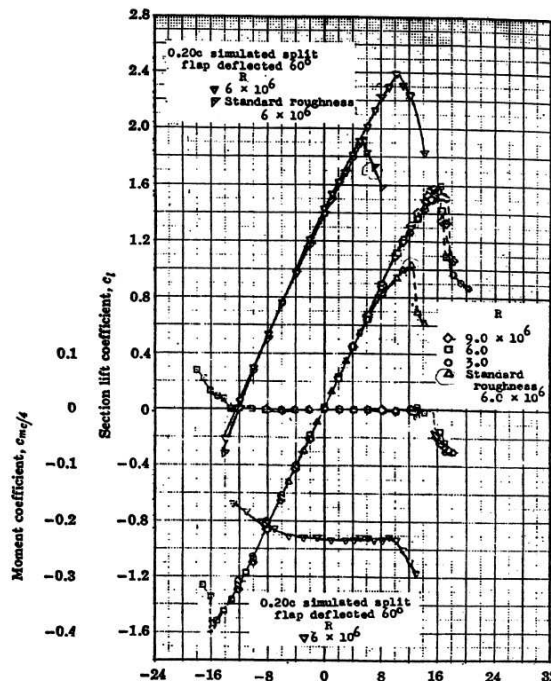


Figura 5.9 Variación del coeficiente de sustentación con el ángulo de ataque de un perfil NACA 0012 a diferentes rugosidades superficiales

Como se ha descrito, el hecho de que el ángulo crítico esté en el rango indicado implica que se podrá construir un perfil lo suficientemente grande como para que su fabricación y manipulación sean más fáciles, sin que su tamaño interfiera en los ensayos al interactuar el perfil con las paredes del túnel.

Por otro lado, se puede también observar la suavidad de las gráficas características del perfil, alcanzando a pronosticar que los resultados que se obtengan en los ensayos tendrán gráficas igualmente suaves. Esto cumple la cuarta especificación previa.

A continuación se puede observar la gráfica de C_L frente a C_D obtenida de la misma referencia que la figura 5.9:

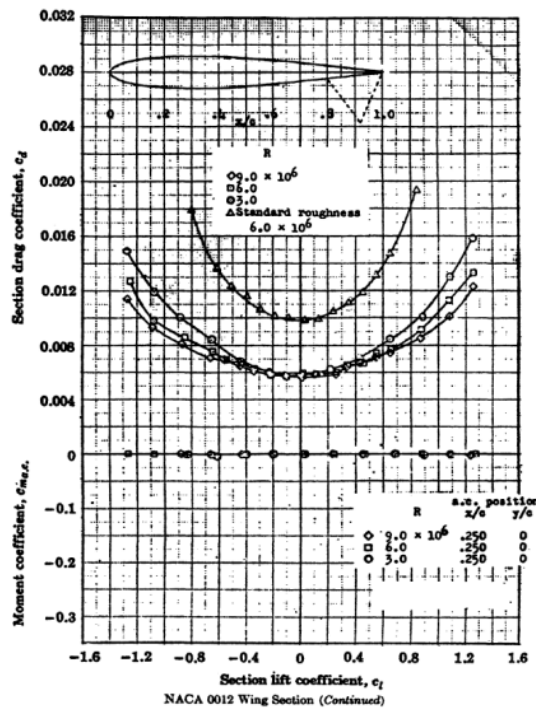


Figura 5.10 Variación del coeficiente de arrastre con coeficiente de sustentación de un perfil NACA 0012 a diferentes rugosidades superficiales

El perfil NACA 0012, como todos los de la serie NACA, es un perfil normalizado. Es decir, está definido por una ecuación a partir de la que obtendremos sus coordenadas.

En nuestro caso las coordenadas que utilizamos para su diseño las obtenemos directamente de ABBOT & VON DOENHOFF (1959). Estas las encontramos en función del valor de la cuerda y las incluimos en el Anexo I.

Capítulo 6. Diseño y fabricación de los perfiles aerodinámicos

6.1 Introducción

6.2 Selección de las dimensiones del perfil aerodinámico

6.3 Diseño 3-D del perfil aerodinámico

6.3.1 Perfil en una pieza

6.3.2 Perfil en dos piezas

6.4 Método de fabricación del perfil aerodinámico

6.4.1 Presupuestos

6.4.2 Posición

6.4.3 Elección de los perfiles a fabricar

6.4.4 Montaje

6.5 Rugosidad

6.5.1 Introducción

6.5.2 Características de la rugosidad

6.5.3 Influencia de la rugosidad sobre los perfiles aerodinámicos

6.5.4 Tipos de medición de la rugosidad

6.5.5 Medida de la rugosidad

6.5.6 Medidas

6.5.7 Conclusiones

6.1 Introducción

El perfil aerodinámico que pretendemos fabricar es un NACA 0012 mediante impresoras 3D, como ya hemos introducido en los capítulos previos.

En principio teníamos dos de estos perfiles a nuestra disposición. Estaban fabricados en madera, pero desde un principio se descarta su utilización por el deterioro que habían sufrido causa del tiempo y el uso.



Figura 6.1 Perfil de madera



Figura 6.2 Perfil de madera "tufts"

Para llevar a cabo la fabricación de perfiles mediante una impresora 3D es necesario un diseño previo del perfil utilizando programas de CAD. En esto es en lo que se centra la primera parte de este capítulo y una vez desarrollado el diseño del perfil se pasará a explicar el ensamblaje de las distintas partes del mismo.

Debido a limitaciones en la impresora tridimensional de la UPCT, se encarga un segundo perfil a un proveedor externo. Es evidente que el acabado de los dos perfiles será diferente, por lo que realizamos medidas del rugosidad sobre los mismos para que cuando comparemos las

fuerzas aerodinámicas sobre los perfiles con datos de referencia podamos sacar unas conclusiones relativas a la rugosidad.

El perfil fabricado en la UPCT, como ya se explicó en el capítulo 4, está fabricado en dos partes y cuando hablemos de perfil 1 nos estaremos refiriendo a este. El que ha sido fabricado por la empresa externa, ha sido realizado de una sola pieza y cuando hablemos de perfil 2 nos estaremos refiriendo a este.

6.2 Selección de las dimensiones del perfil aerodinámico

Lo primero que decidimos son las dimensiones que ha de tener nuestro perfil. Como hemos visto antes, la bibliografía nos ofrece unas coordenadas normalizadas para el NACA-0012. Estas vienen expresadas en función de la cuerda. Por lo tanto tan solo tenemos que decidir las dimensiones de la cuerda y la longitud del perfil, así como del taladro en el que ira alojado la varilla que nos permite sujetar el perfil a la balanza aerodinámica.

La longitud debe de ser tal, que el perfil ocupe toda la sección de ensayos del túnel aerodinámico en la dirección perpendicular y horizontal al sentido del flujo. De este modo se producirá un flujo bidimensional, que es lo que nos interesa estudiar. No tomamos exactamente la misma medida que la de la sección de ensayos, ya que al modificar el ángulo el perfil rozaría y acabaría deformándose.

La medida para la cuerda utilizada es la misma que la del perfil de madera, que ya se había utilizado en ensayos previos en el mismo túnel.

Para la elección del taladro, primero buscamos en los catálogos de secciones redondas normalizadas y elegimos aquella que se ajuste correctamente a las dimensiones de nuestro perfil.

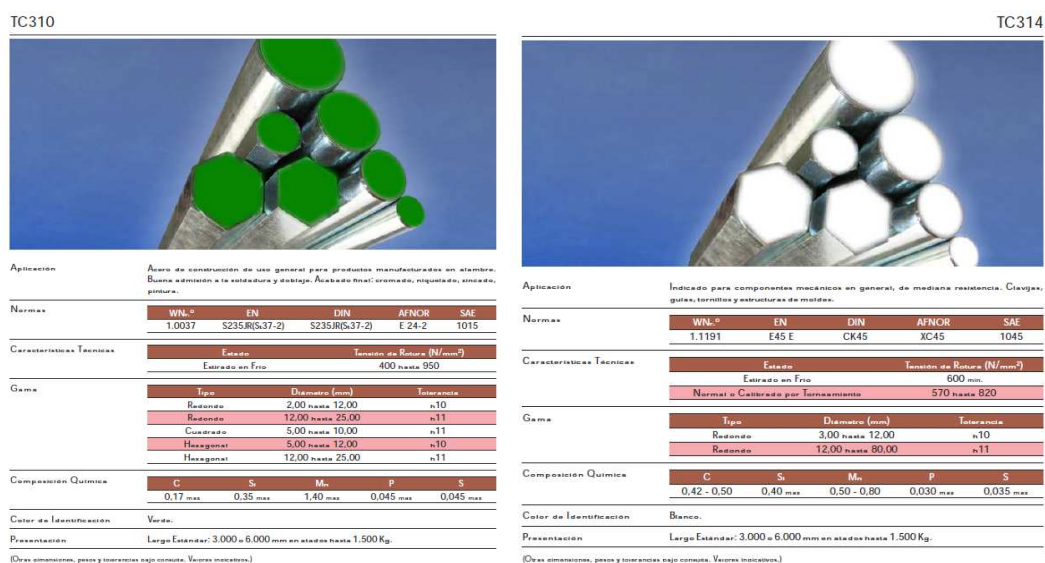


Figura 6.3 Secciones que se ajustan a las dimensiones de nuestro perfil

Como ya hemos dicho, tuvimos que realizar un diseño en dos partes debido a las limitaciones de las impresoras disponibles. Por lo que a la hora de decidir el tamaño del taladro, también tuvimos que tener en cuenta la unión entre ambas piezas. Ya que un agujero demasiado grande, haría que la unión entre ambas piezas fuera muy débil. Por lo que finalmente elegimos un tamaño de varilla algo menor que la del perfil de madera.

Para aportar rigidez realizamos el taladro hasta el final del perfil. Así, las fuerzas aerodinámicas sobre el perfil las soportará la varilla. Dándole robustez a un diseño que debe ser capaz de soportar las fuerzas producidas por el túnel aerodinámico. En el diseño del perfil en una sola pieza el taladro no lo realizamos hasta el final, para una vez fabricado poder decidir cuál de las dos opciones es más conveniente.

Tenemos que tener en cuenta que el tamaño del agujero tendrá que ser unas décimas superior a la varilla que introduzcamos, para poder introducirla con garantías de no romper las piezas.

Presentamos a continuación un esquema de las varillas empleadas:

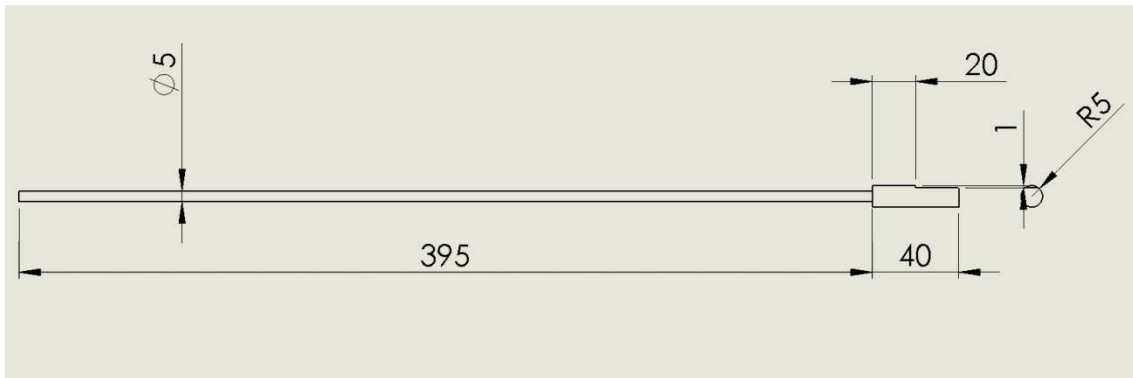


Figura 6.4 Croquis varilla perfil 1

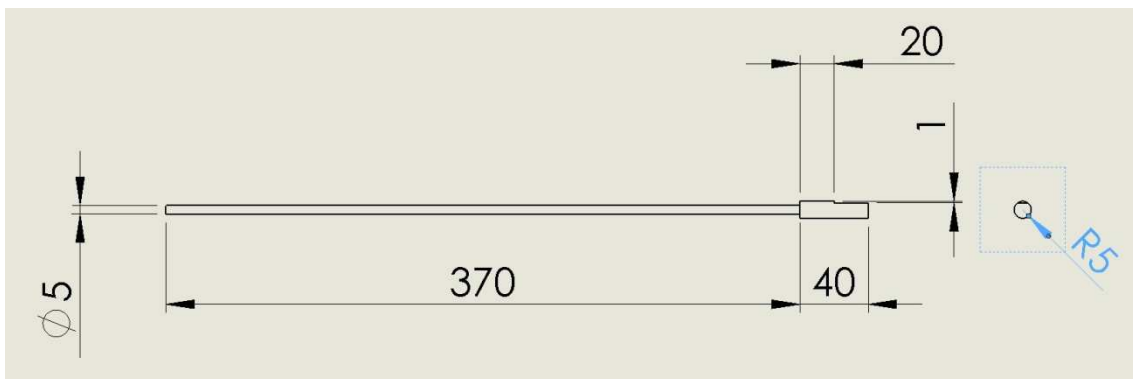


Figura 6.5 Croquis varilla perfil 2

6.3 Diseño 3-D del perfil aerodinámico

Como ya hemos mencionado vamos a utilizar programas de CAD para el diseño de los perfiles. En concreto, vamos a trabajar con SolidWorks.

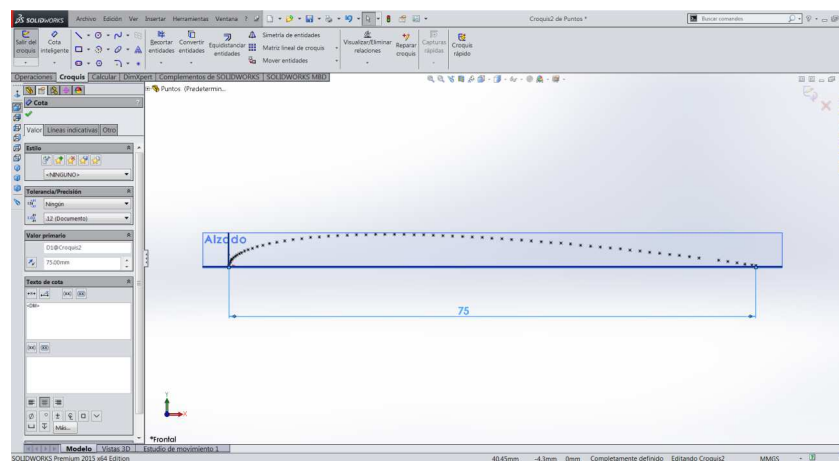
Las dimensiones de los perfiles fabricados que hemos seleccionado en el apartado anterior, vendrán detalladas en los planos presentados a lo largo de este apartado.

En el Anexo I encontramos las coordenadas del NACA 0012 en función de la cuerda y también las que utilizamos en nuestro perfil en particular.

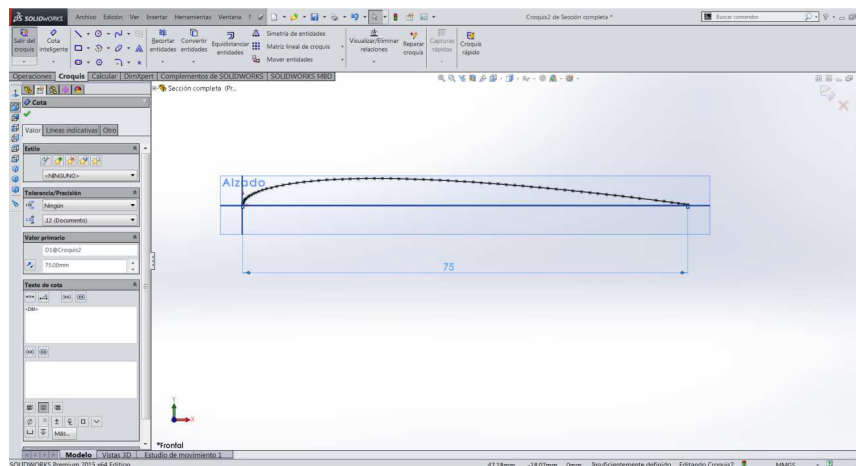
A continuación vamos a desarrollar el procedimiento de diseño para cada uno de los perfiles.

6.3.1 Perfil en una pieza

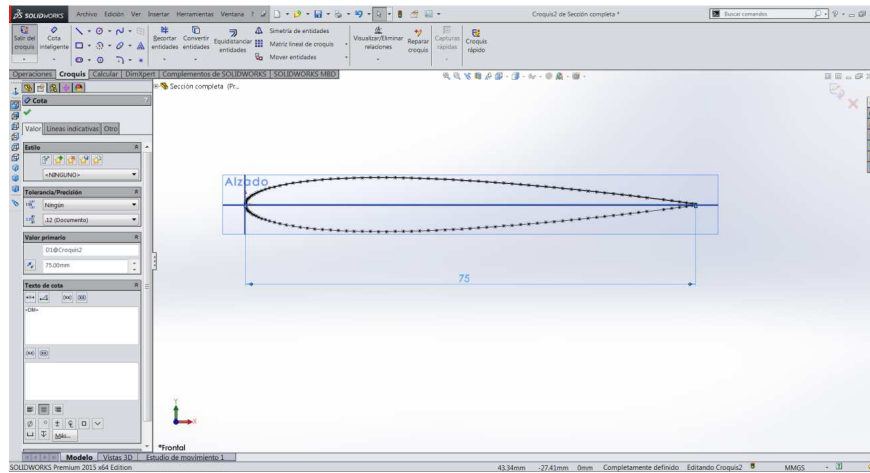
1. Como el perfil es simétrico no es necesario representar todas las coordenadas del perfil, sino que representamos las de un lado y más adelante haremos simetría. Utilizamos las coordenadas de la tabla I.2 del Anexo I, en las que se ha sustituido el valor de la cuerda.



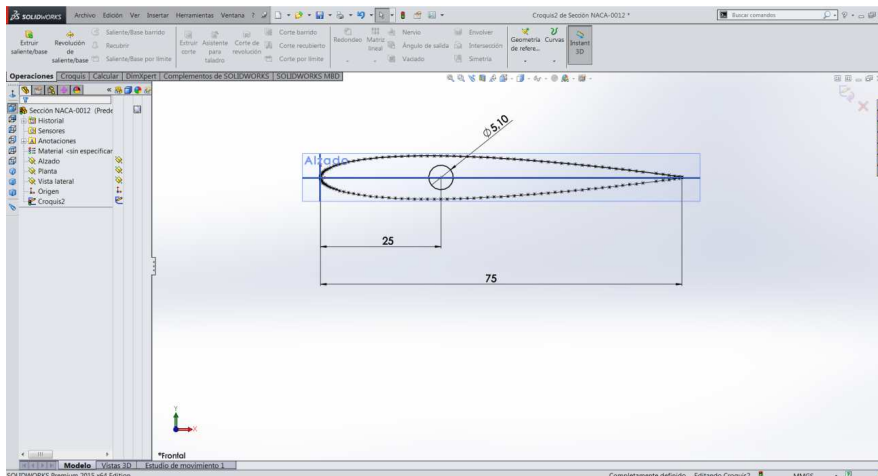
2. A continuación unimos todos los puntos representados utilizando la función "spline"



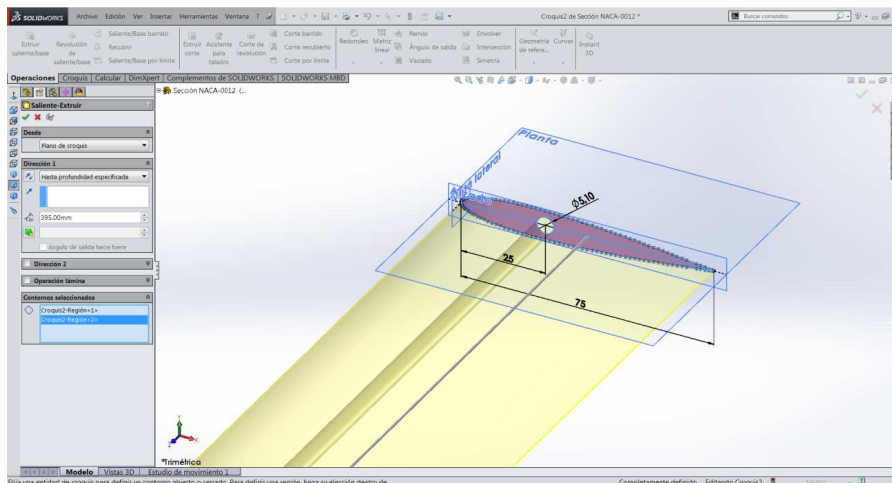
3. Como hemos dicho el perfil es simétrico, por lo que hacemos simetría respecto al eje X de la forma anteriormente generada. Obtenemos de este modo el contorno de un NACA 0012.

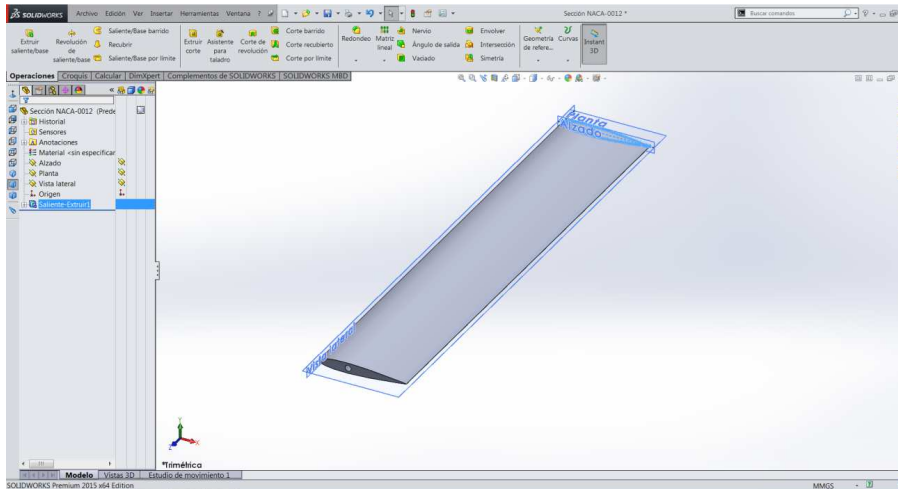


4. A 1/3 del valor de la cuerda realizamos una circunferencia que tendrá una décima más del tamaño de la varilla que irá alojada en el interior del perfil.



5. La sección anteriormente realizada la extruímos hasta el tamaño de envergadura que hemos decidido para nuestro perfil. Y así terminamos de diseñar el perfil. El plano del NACA 0012 en una pieza lo encontramos en la figura V.1 del Anexo V.



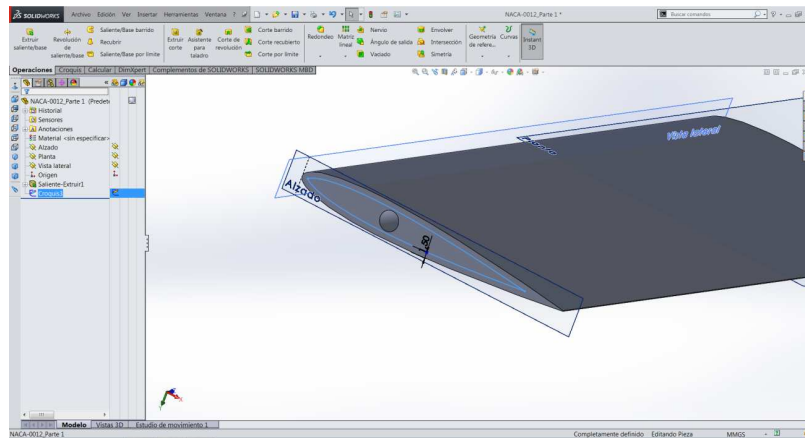


6.3.2 Perfil en dos piezas

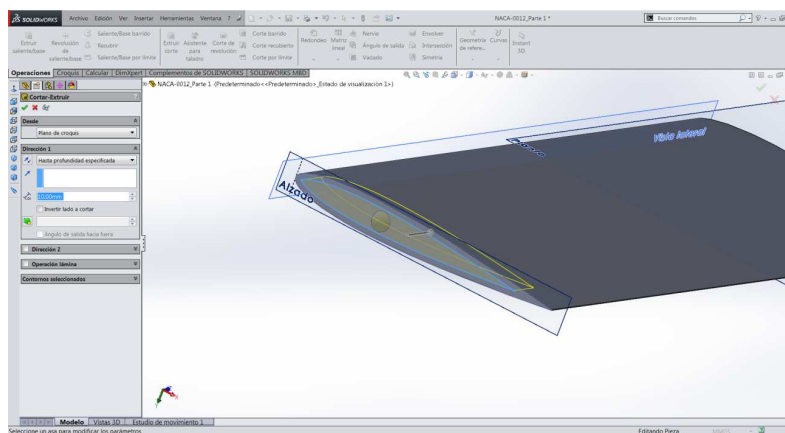
Para fabricar el perfil en dos piezas realizamos dos partes que montaremos mediante una unión macho hembra, que explicamos a continuación como realizarla.

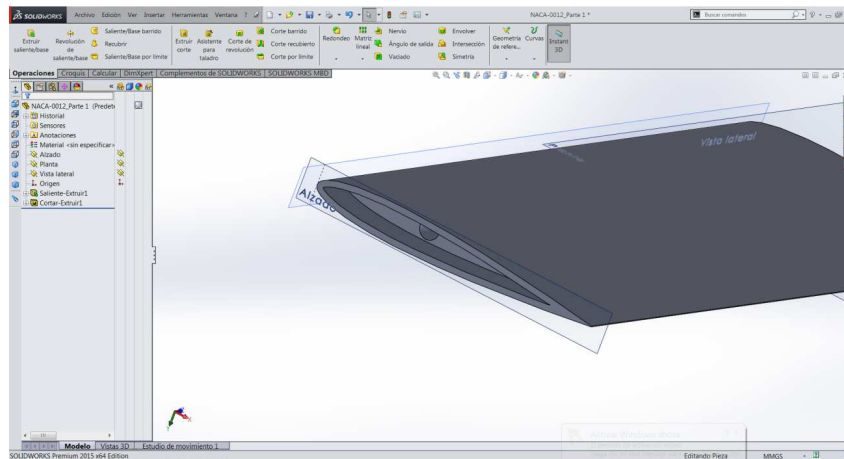
Parte 1

Para obtener la primera parte realizamos un croquis que sea equidistante a la sección del perfil, que hemos dibujado en el los tres primeros pasos del apartado 6.3.1.



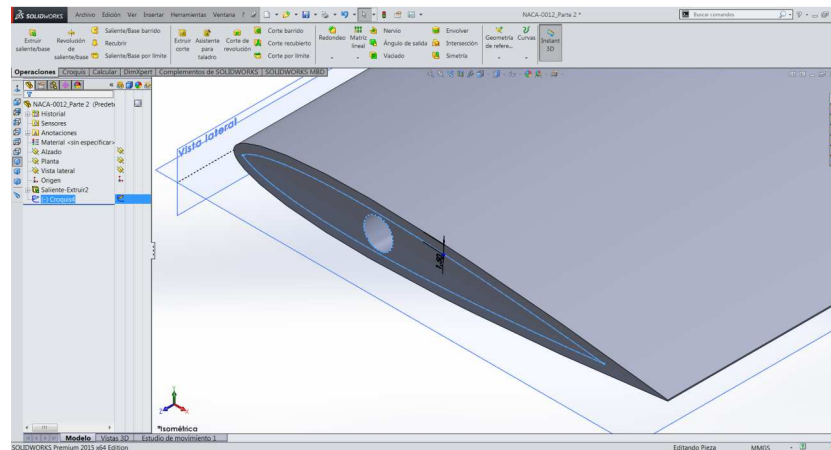
Y a partir de este croquis realizamos un corte



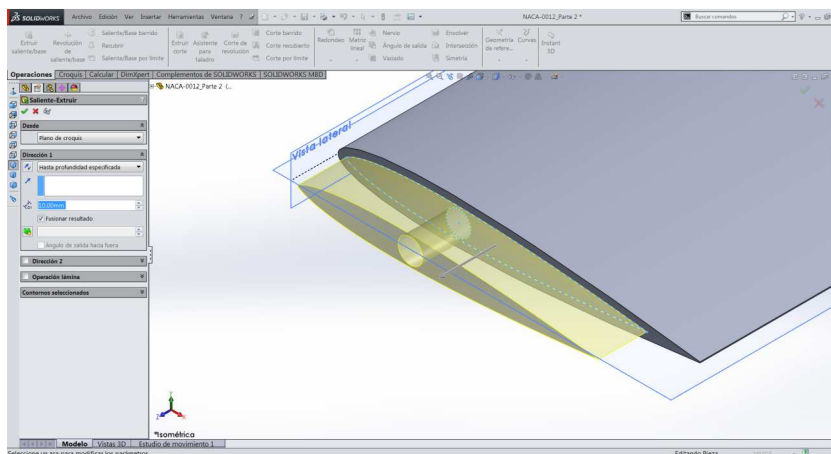


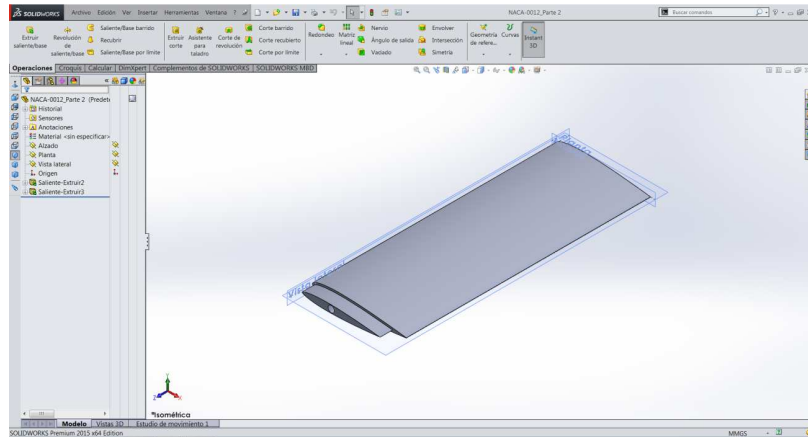
Parte 2

Para obtener la segunda parte del perfil realizamos un croquis que sea equidistante a la sección del perfil igual que hacíamos con la primera parte.



Y a partir de este croquis extruímos con una profundidad igual a la del corte anterior

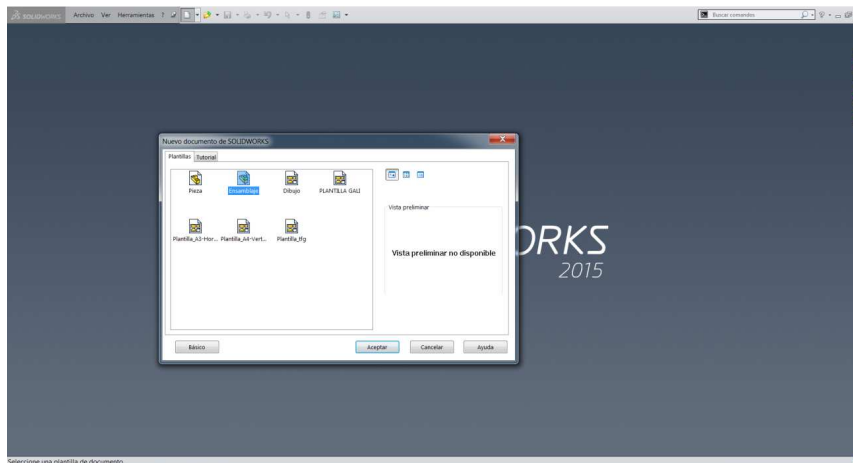




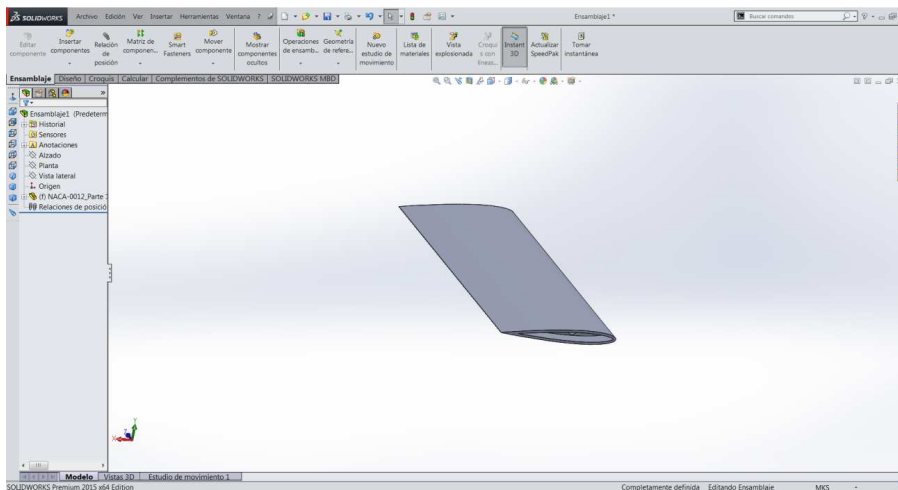
Ensamblaje

Una vez hemos realizado las dos partes del perfil utilizamos la función "ensamblaje" para comprobar que las dos partes están correctamente diseñadas. Y que para cuando las fabriquemos tengamos la certeza de que el ajuste de ambas piezas va a ser lo más preciso posible. Para realizar esta operación seguimos los siguientes pasos:

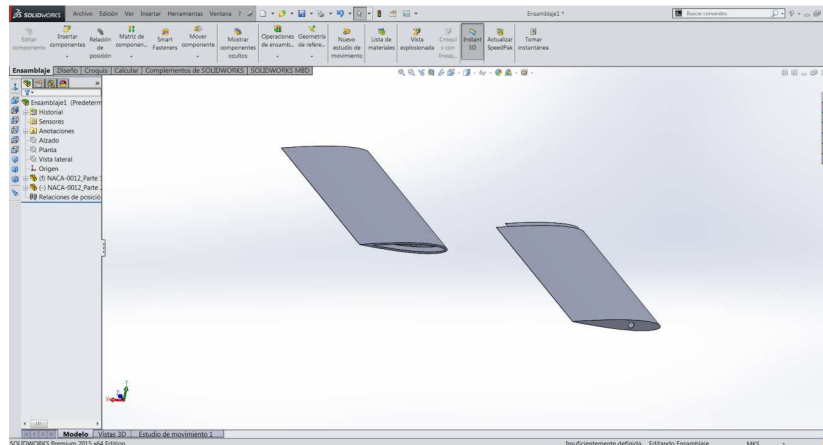
1. Abrimos un nuevo documento y seleccionamos la opción de ensamblaje



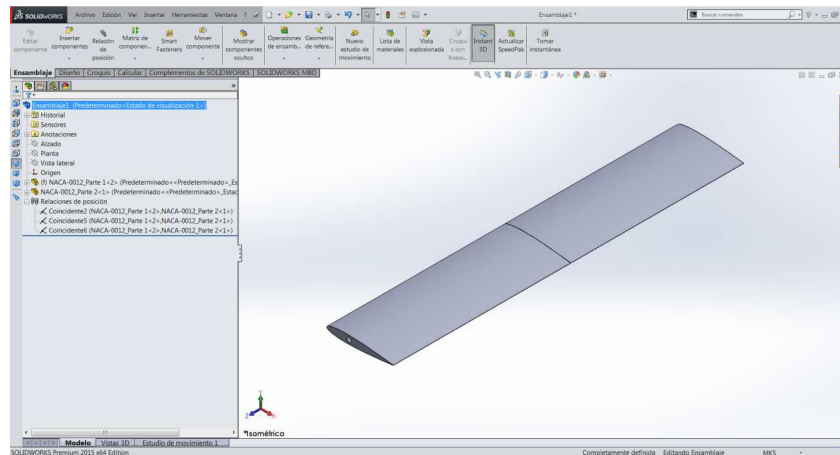
2. Abrimos la primera parte del perfil y la fijamos en el espacio



3. A continuación, abrimos la segunda parte del perfil y lo colocamos en una parte cualquiera del espacio



4. Ahora tendremos que darle las relaciones de posición adecuadas a la segunda parte para que encaje con la primera. El resultado final obtenido es el siguiente



Los planos del ensamblaje y de cada una de las partes, los encontramos en el anexo V en las figuras V.2, V.3 y V.4.

6.4 Fabricación del perfil aerodinámico

6.4.1 Presupuestos

Una vez que hemos realizado el diseño 3D del elemento a fabricar, podemos obtener el archivo generado en el formato ".stl". De este modo, podemos realizar un presupuesto estimativo del perfil con cada una de las impresoras disponibles que ya presentamos en el Capítulo 4.

Descripción	Importe
Prototipo en ABS de la pieza en forma stl obtenida a partir del fichero 3D Parte 1 recibido (a máxima resolución por trazado 0.2540 mm)	108.17 €
Prototipo en ABS de la pieza en forma stl obtenida a partir del fichero 3D Parte 2 recibido(a máxima resolución por trazado 0.2540 mm)	101.99 €
Total	210.16 €

Figura 6.6 Presupuesto ABS Plus

Descripción	Importe
Prototipo en PolyJet de la pieza en formato stl a partir del fichero 3D Parte 1 recibido	126.12 €
Prototipo en PolyJet de la pieza en formato stl a partir del fichero 3D Parte 2 recibido	127.81 €
Total	253.93 €

Figura 6.7 Presupuesto PolyJet

La empresa PIXEL SISTEMAS nos puede suministrar el perfil en una sola pieza con el siguiente costo:

366 € + 21% IVA

6.4.2 Posición

El siguiente problema a solucionar es la posición en la que fabricar los perfiles con la impresora 3D. Como ya hemos dicho, ninguna de las dos impresoras disponibles en el SAIT nos ofrece la posibilidad de obtener el perfil en una sola pieza.

Con el diseño realizado en dos piezas tenemos distintas posibilidades. En la primera impresora, que trabaja con ABS Plus, podemos fabricarlas en horizontal y en vertical. En la segunda, que trabaja con PolyJet, solo podemos fabricarlas en horizontal debido a la limitación en la coordenada vertical que presenta esta segunda impresora.

Buscamos el método que nos de una pieza lo más acorde posible a la diseñada. Por lo que a partir de la sección del NACA-0012 antes presentada, realizamos una pieza en el que cada una de las dos partes tendrá un centímetro de longitud. Y a partir de esta pieza realizamos distintas pruebas en vertical y horizontal con las diferentes impresoras.

6.4.3 Elección de los perfiles a fabricar

Las conclusiones que sacamos de las pruebas realizadas con las impresoras del SAIT son, que el acabado superficial es mejor en las piezas fabricadas horizontalmente y que la calidad del acabado superficial que ofrece la impresora que trabaja con ABS Plus es peor. Esta última anotación era de esperar, puesto que la precisión de esta máquina es inferior a la que trabaja con PolyJet.

Como ya dijimos nos interesa obtener un perfil fabricado en una sola pieza, para poder compararlo con el obtenido en el SAIT. Por lo que también encargamos el perfil que nos proporciona PIXEL SISTEMAS y que estaba fabricado con ASA. La fabricación de este perfil se realizará en vertical, ya que la empresa asegura que es el modo mediante el que se obtendrá un mejor acabado superficial.

6.4.3 Montaje

Una vez fabricadas las piezas, la primera operación a realizar es la de la limpieza del agujero en el que va alojada la varilla. En ambos casos la limpieza la hacemos de modo manual.

En el caso del perfil en dos partes que nos suministra el SAIT, utilizamos una broca del diámetro del agujero soldada a una varilla de tamaño menor para limpiar perfectamente el agujero.

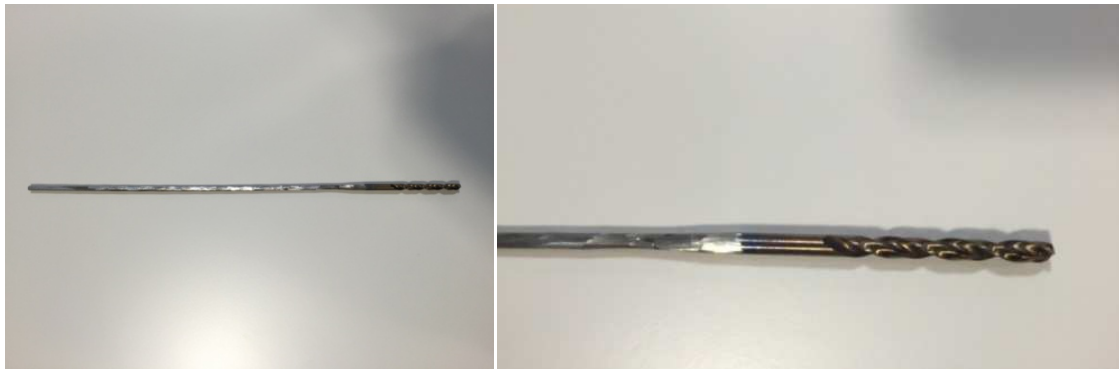


Figura 6.8 Broca soldada a una varilla para limpiar el agujero del perfil en dos piezas

En el caso del perfil en una pieza, se nos facilita con el agujero vaciado. Aunque a la hora de introducir la varilla nos encontramos que aun quedaban pequeñas virutas que nos impedían introducirla. En este caso la limpieza resulta algo más complicada que en el caso anterior, ya que el agujero no atraviesa el perfil al completo y se hace más difícil sacar el material soporte sobrante. Para solucionarlo utilizamos un alambre en forma de gancho.



Figura 6.9 Alambre en forma de gancho para limpiar el agujero del perfil en una pieza

Antes de introducir las varillas tenemos que unir el perfil fabricado en dos partes. Para ello utilizamos una soldadura fría que resulta adecuada para la unión de perfiles fabricados con

este tipo de material. El uso de esta se hace necesario debido a que entre las dos partes queda una pequeña línea que hay que rellenar con material.



Figura 6.10 Soldadura metálica en frío y resultado de aplicación en el perfil

El principal problema es que el método de distribución de la soldadura en la junta carece de precisión, por lo que una vez apliquemos y solidifique tendremos que lijar para dejar la superficie lisa. Al lijar nos encontramos con el problema de que poder comprometer las coordenadas reales del perfil. Para minimizar el perjuicio que esta operación pueda tener sobre las dimensiones de nuestro perfil utilizamos una de las lijas más pequeñas de las que disponemos. Concretamente empleamos el papel de agua P600.



Figura 6.11 Papel lija

A la hora de unir las dos partes dimos con otro problema. Y es que el perfil fabricado con PolyJet en el SAIT presenta una fragilidad alta, sobre todo en la unión de las dos partes. Esto dio lugar a que, durante las pruebas de unión se produjera la fractura de una pequeña parte de la misma. Inconveniente que se solucionó pegando y rellenando las juntas con la soldadura fría anteriormente mencionada.



Figura 6.12 Fractura producida en la manipulación del perfil

Una vez que tenemos los dos perfiles en una sola pieza, el siguiente paso a dar es la introducción de la varilla correspondiente en cada uno de ellos.

Utilizamos un redondo de acero, de las mismas características que los especificados en el catálogo de la figura 6.3, pero que teníamos a nuestra disposición en el laboratorio de ensayos. El diámetro inicial de la varilla es de 5 mm de diámetro. Y a partir de este, se realiza un corte para adaptarlo a las medidas buscadas y se somete a mecanizado para obtener la parte con la que fijaremos el perfil a la balanza.



Figura 6.13 Resultado final de una de las varillas de los perfiles

Para fijar la varilla al perfil lo hacemos con un pegamento rápido de contacto. Este ofrece buenos resultados a corto plazo, pero pasados unos días se pierde la unión aunque tanto el perfil como la varilla se mantienen en perfectas condiciones. Por lo tanto nos vemos obligados a buscar otro tipo de fijador que mantenga la unión entre ambos elementos de forma prolongada en el tiempo y que no comprometa las pruebas que se realizarán con estos perfiles. Finalmente utilizamos la soldadura fría utilizada en la unión de las dos partes del primer perfil.

Como se observa en la siguiente figura, dejamos una pequeña holgura entre la parte ancha de la varilla y el comienzo del perfil. Esto es debido a que, para no dañar la balanza, hay que dejar una holgura de unos milímetros entre el disco ancho de esta y la pared de la sección de ensayos, dato que ya comentamos en el apartado 2.1.2.2 del Capítulo 2. Y para poder colocar el perfil en la balanza cumpliendo esta condición, se hace necesario que deje esa pequeña holgura al introducir la varilla en el perfil.

En el caso del perfil fabricado en dos partes, como el agujero lo atraviesa por completo, será necesario tapan el orificio final, también con la soldadura fría que ya hemos utilizado antes y lijando a continuación.

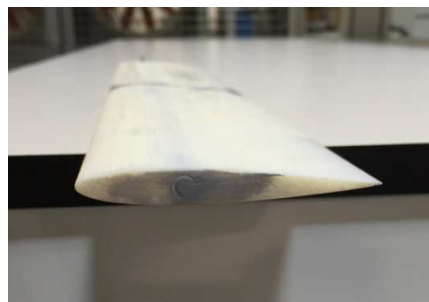


Figura 6.14 Orificio final tapado con la soldadura metálica en frío

Llegados a este punto ya contamos con los dos perfiles con los que trabajaremos.

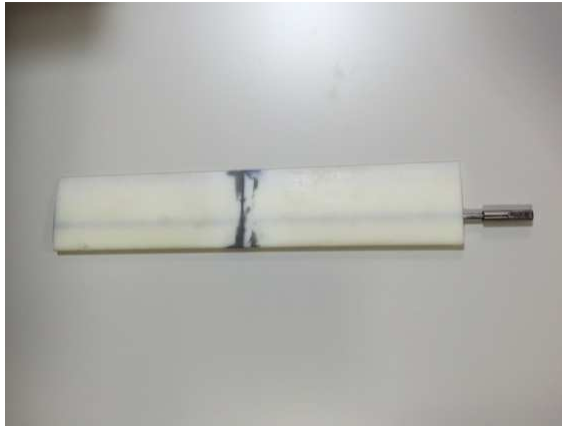


Figura 6.15 Perfil fabricado en el SAIT en dos piezas



Figura 6.16 Perfil fabricado en STRATASYS en una pieza

6.5 Rugosidad

6.5.1 Introducción

El constante progreso en el área industrial exige métodos cada vez más eficientes para la obtención de productos cada vez más sofisticados. El diseño de nuevos mecanismos exige una perfección creciente y las tolerancias de fabricación se hacen cada día menores, tanto que las formas anteriormente aceptadas debido a su método de obtención a través de máquinas-herramientas, ya no podrán ser más aplicadas sin previa verificación de su geometría y textura superficial.

Superficies reales, por más perfectas que sean, presentan particularidades que son una marca del método empleado para su obtención, por ejemplo: torneado, fresado, rectificado, bruñido, lapidado, etc. Las superficies así producidas se presentan como conjunto de irregularidades, espaciamiento regular o irregular y que tienden a formar un patrón ó textura característica en

su extensión. En esta textura superficial se distinguen dos componentes distintos: rugosidad y ondulación.

La rugosidad ó textura primaria, está formada por surcos o marcas dejadas por los agentes que atacan la superficie en el proceso de mecanizado (herramienta, partículas abrasivas, acción química, etc.) y se encuentra superpuesta al perfil de ondulación. Los espacios entre crestas varían entre 4 y 50 veces la profundidad de la depresión.

La ondulación o textura secundaria es el conjunto de irregularidades repetidas en ondas de paso mucho mayor que la amplitud y que pueden ocurrir por diferencia en los movimientos de la máquina-herramienta, deformación por tratamiento térmico, tensiones residuales de forja o fundición, etc.

Los espaciamentos entre las ondas (compresiones de ondulación) pueden ser de 100 a 1000 veces su amplitud.

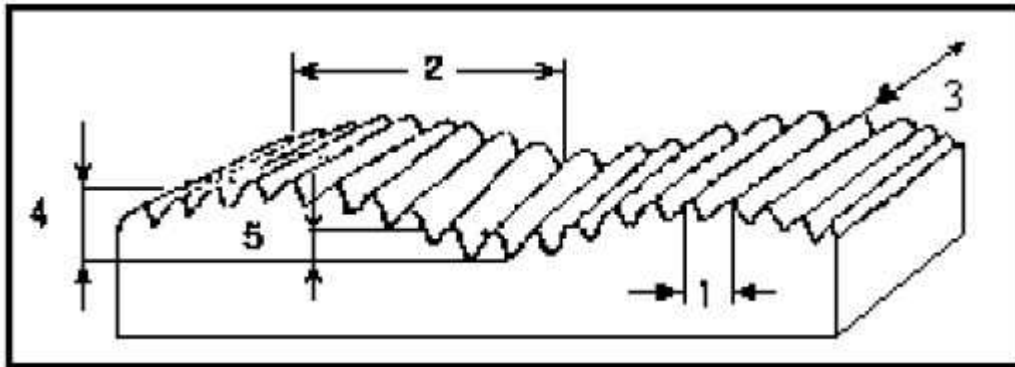


Figura 6.17 Representación esquemática de la vista microscópica de la superficie

- 1- Extensión de rugosidad.
- 2- Extensión de ondulación.
- 3- Orientación de los surcos.
- 4- Amplitud de ondulación.
- 5- Amplitud de rugosidad (Altura pico-valle).

Como se observa en la Figura 6.17, una superficie presenta errores de diferentes magnitudes y su definición es posible a través de medios o técnicas también diferentes, por eso, para facilitar su estudio, se dividen en dos grandes grupos: errores macrogeométricos y errores microgeométricos.

Los errores macrogeométricos también llamados también errores de forma o de textura secundaria y que incluyen entre ellos divergencias de ondulación, ovalización, multifacetamiento, conicidad, cilindricidad, planedad, etc., y son posibles de medición a través de instrumentos convencionales como micrómetros, comparadores, proyectores de perfiles, etc.

Los Errores microgeométricos conocidos como errores de rugosidad o de textura primaria. Su perfil está formado por surcos, huellas o marcas dejadas por los procesos de mecanizado durante la fabricación. Su medición solamente es posible debido al progreso en la electrónica que con auxilio de circuitos electrónicos desarrollaron aparatos basados en sistemas que utilizan una pequeña aguja de punta muy aguda para recorrer una muestra de la superficie y definir numérica o gráficamente su perfil.

6.4.2 Características de la rugosidad

Para estudiar y crear sistemas de evaluación del estado de las superficies se hace necesario definir previamente diversos conceptos que permiten crear un lenguaje apropiado, así tenemos:

- Superficie ideal. Es la superficie ideal, por definición sin errores, perfecta. Ejemplo: superficie plana, cilíndrica, etc.
- Perfil Ideal. Perfil resultante del corte de una superficie ideal por un plano perpendicular. En algunas normas esta característica es denominada perfil nominal, y es el perfil ideal, por definición sin errores.
- Superficie Real. Es la superficie que limita al cuerpo y la separa del medio ambiente
- Perfil Real. Es el perfil resultante de cortar una superficie real por un plano definido en relación a la superficie ideal. Limita la sección material y la separa del medio ambiente, incluida la ondulación.
- Perfil Efectivo. Imagen aproximada de un perfil real obtenido por un medio de evaluación ó medición. El perfil efectivo es función de las características geométricas y físicas del instrumento de medición y de la técnica utilizada para su evaluación. No es filtrado y su diferencia con el perfil real es una cierta deformación causada por la imprecisión del aparato.
- Perfil de rugosidad. Se obtiene a partir del perfil efectivo por un instrumento de evaluación con sistema de filtrado (filtrado de ondas) para excluir otras irregularidades (ondulación, por ejemplo).

De acuerdo a las definiciones presentadas, se concluye que el perfil de rugosidad está superpuesto al perfil de ondulación, de allí la necesidad de contar con un sistema que permita excluir a este último para una medición de influencias indeseadas.

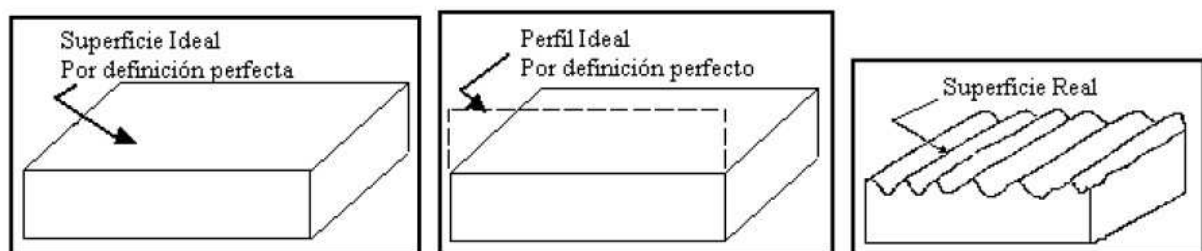


Figura 6.18 Superficie ideal. Perfil ideal. Superficie real

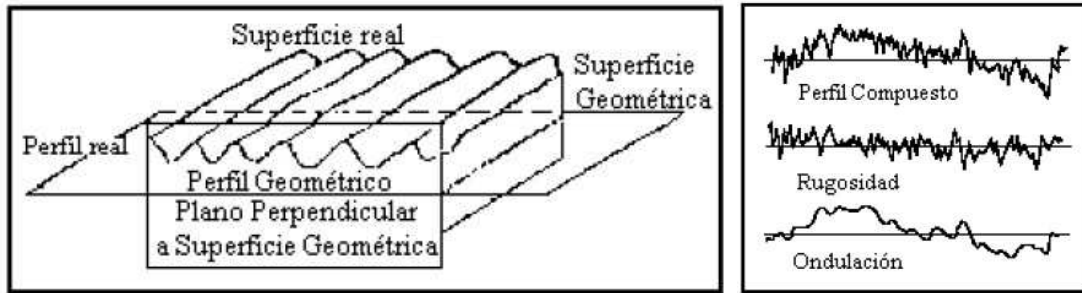


Figura 6.19 Perfil real

6.5.3 Influencia de la rugosidad sobre los perfiles aerodinámicos

Influencia en la sustentación

Se sabe que la rugosidad de la superficie, especialmente cerca del borde de ataque, tiene grandes efectos en las características de los perfiles aerodinámicos. El coeficiente de sustentación máximo, en particular, es sensible a la rugosidad del borde de ataque.

El coeficiente de sustentación máximo, decrece progresivamente conforme aumenta la rugosidad.

Para unas condiciones de superficie dadas para el borde de ataque, el coeficiente de sustentación máximo aumenta lentamente a medida que aumenta el número de Reynolds como podemos ver en la figura 6.20.

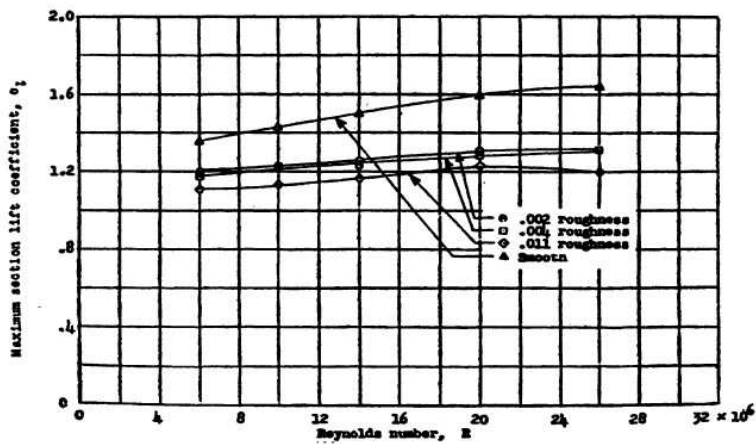


Figura 6.20 Representación del Reynolds frente al C_L

La figura 6.21 muestra como las líneas de rugosidad localizadas tras el 0.20c desde el borde de ataque, tienen poco efecto sobre el coeficiente de sustentación máximo o sobre la pendiente de la curva de sustentación.

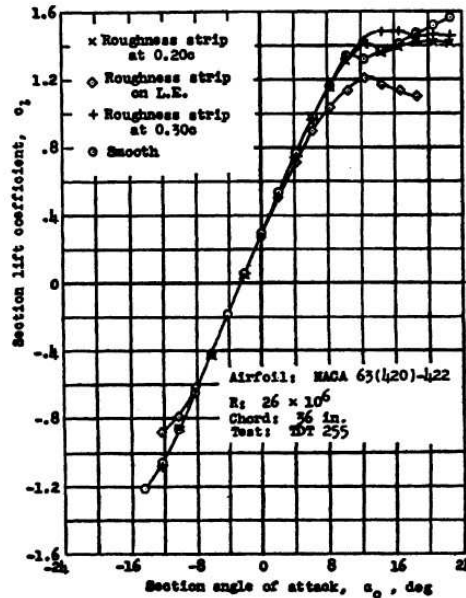


Figura 6.21 Influencia de la rugosidad superficial en el coeficiente de sustentación en diferentes localizaciones de la cuerda

Es deseable determinar el efecto relativo de la rugosidad del borde de ataque en varios secciones alares. Para hacer una investigación sistemática de este tipo, es necesario seleccionar una forma estándar de rugosidad. La rugosidad del borde de ataque estándar elegida por la NACA para los modelos de 24 pulgadas de cuerda consiste en granos de carbón de 0.011 pulgadas aplicados sobre la superficie del modelo desde el borde de ataque hasta una longitud de 0.08c sobre las dos superficies. Los granos son finamente esparcidos para cubrir de un 5 a un 10 por ciento del área. Esta rugosidad estándar es menos severa que la que probablemente encontremos en servicio como resultado de la acumulación de hielo, barro, o por daño en combate militar.

Influencia en el arrastre

Numerosas medidas de los efectos de las irregularidades en la superficie en las características de las alas, han mostrado que las condiciones de la superficie es una de las más importantes variables que afectan al arrastre. Se produce un incremento substancial del arrastre resultado de la rugosidad superficial en la región de flujo turbulento. Es en consecuencia importante mantener una superficie lisa incluso cuando el flujo laminar es inesperado.

Ningún método preciso para especificar las condiciones necesarias de la superficie para flujo laminar a alto número de Reynolds ha sido desarrollado, aunque sí han sido alcanzadas algunas conclusiones generales. Se puede asumir que, para un número de Reynolds y una posición de la cuerda dados, el tamaño de la cuerda variará directamente con la cuerda de la sección transversal.

Determinación de la influencia de la rugosidad

Como ya hemos mostrado, la rugosidad de la superficie va a influir tanto en el arrastre como en la sustentación de nuestros perfiles aerodinámicos.

Hay herramientas informáticas, como las que proporciona el programa ANSYS, a través de las que podemos observar cómo la rugosidad influye en las características de los perfiles.

A continuación se muestra una imagen obtenida con dicho programa, mediante el correspondiente algoritmo, en la que se puede observar con claridad el efecto de la rugosidad superficial en un perfil NACA-0012.

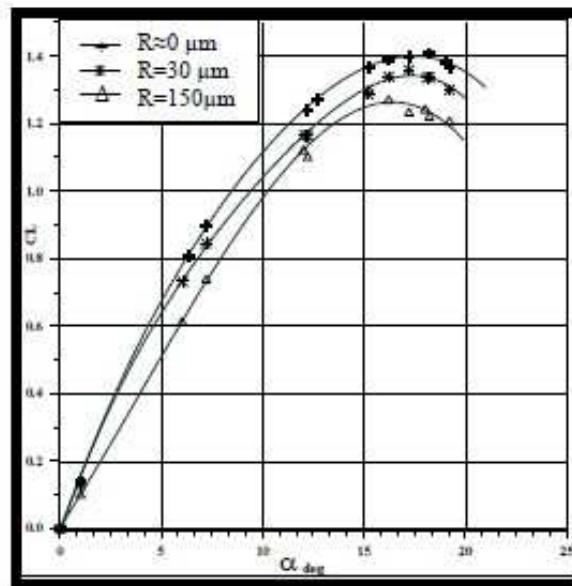


Figura 6.22 Variación del coeficiente de sustentación con el ángulo de ataque de un perfil NACA 0012 a diferentes rugosidades superficiales

6.5.4 Tipos de medición de la rugosidad

Existen diversos parámetros de rugosidad. Entre los más importantes se encuentran el Ra, Rq, Rx, Ry o Rz.

En las gráficas obtenidas del libro "Theory of wing sections" se presenta una rugosidad estándar que introducimos en el perfil de modo experimental para estudiar su influencia sobre las características del mismo.

En cambio cuando trabajamos con programas informáticos con los que simulamos dicha rugosidad superficial, estamos hablando de uno de los parámetros normalizados que acabamos de presentar. En concreto el parámetro utilizado para realizar la gráfica de la figura 6.22, es el Ra.

El valor de rugosidad R_a es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil, en los límites de la longitud básica l .

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

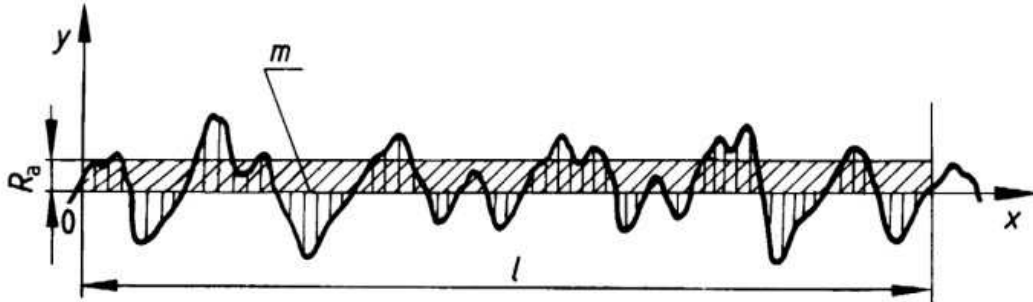


Figura 6.23 Representación de la rugosidad media aritmética

Este parámetro utilizado para medir la rugosidad, así como todos los demás presentados anteriormente, están normalizados y recogidos por la norma ISO 4287-1997

6.5.5 Medida de la rugosidad

La medición de la rugosidad se realiza con el rugosímetro. Este instrumento se compone de:

- Aguja. Se introduce entre los picos y valles. Es de diamante para tener un menor desgaste
- Captador. Registra los movimientos verticales de la aguja
- Patín. Se apoya en la superficie y sirve de filtro mecánico. Son de rubí sintético y hacen que la deformación disminuya
- Motorización. Empuja y arrastra la aguja sobre la superficie
- Electrónica. Registra los datos del captador, los procesa y obtiene los parámetros deseados



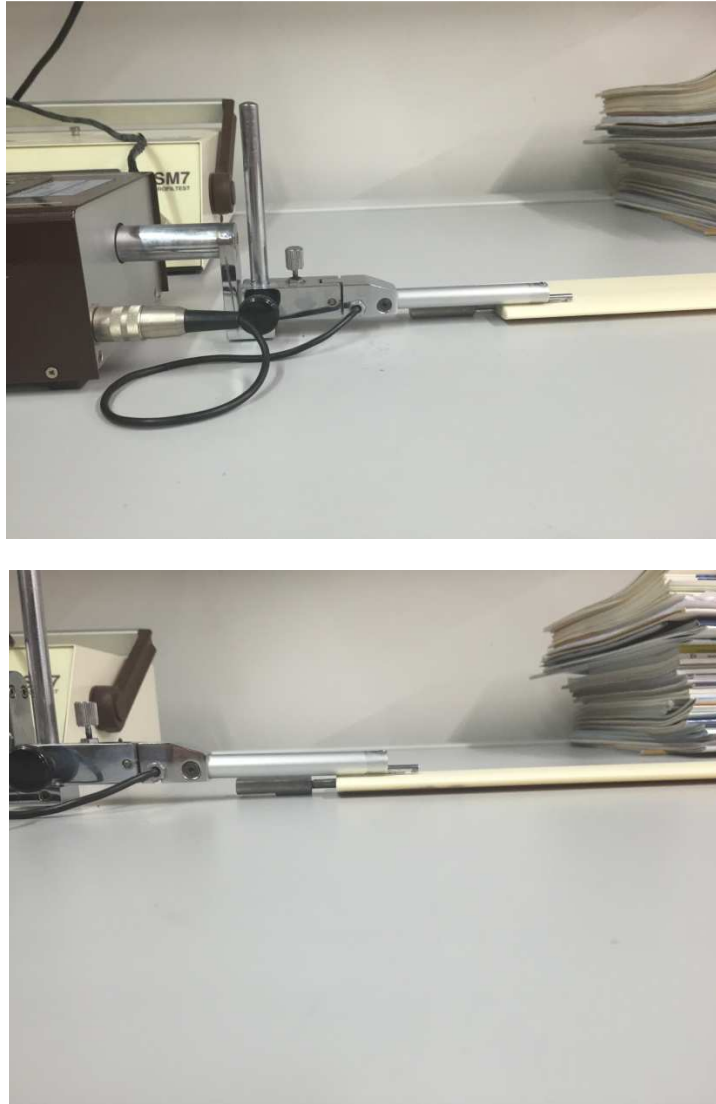


Figura 6.24 Equipo de medida de rugosidad

La medida del parámetro Ra de rugosidad en los perfiles se ha realizado con el SM7 profile test, equipo que se muestra en la figura 6.24.

Hemos seleccionado cuatro secciones en cada una de las dos caras que tienen los perfiles. De estas 4 secciones, en dos hemos medido transversalmente y en las otras dos longitudinalmente. Obteniendo así un amplio rango de medidas que nos permita caracterizar correctamente la rugosidad de cada perfil. Cada sección tiene una longitud característica, l_m , de unos milímetros y que viene determinada por el recorrido que tiene el brazo mecánico que se encarga de tomar la medida y que está impulsado por un pequeño motor.

La sensibilidad de este instrumento de medida es muy alta, por lo que en cada sección se han realizado 10 medidas de las que descartamos las dos más altas y las dos más bajas.

En el perfil 1 nos interesa medir la rugosidad en el punto de unión de las dos partes, ya que hay una discontinuidad de material. Por limitaciones de la máquina, solo podemos tomar medidas en la dirección longitudinal.

A la hora de realizar las medidas nos encontramos con que nuestra superficie es curva. Esto nos obliga a seleccionar con mucho cuidado la sección ensayada, ya que si comenzamos a medir en un pico de la curva el rugosímetro al avanzar se quedará sin superficie que medir y obtendremos por pantalla el mensaje de "overflow".

Por lo tanto para la medida de la rugosidad se ha seguido el siguiente programa de ensayos:

1. Delimitamos las secciones de los perfiles donde se van a realizar las mediciones
2. Colocamos el patín al comienzo de la sección
3. Ajustamos la posición con la ruleta del rugosímetro
4. Una vez fijada la posición tomamos las 10 medidas de modo seguido. Tras la toma de cada medida el rugosímetro vuelve a la posición inicial y no hay que volver a reajustar la posición
5. Una vez tomadas las 10 medidas en la primera sección. Seleccionamos la siguiente y repetimos el procedimiento

En la figura 6.25 podemos observar un esquema de las medidas realizadas en la cara 1 del perfil 1. La sección "L1" de la cara 2 se encontrará en la parte posterior de la medida "L1" de la cara 1 y del mismo modo el resto de secciones. El esquema para el perfil 2 es idéntico pero en este no realizamos la medida "TS" por no haber unión de piezas.

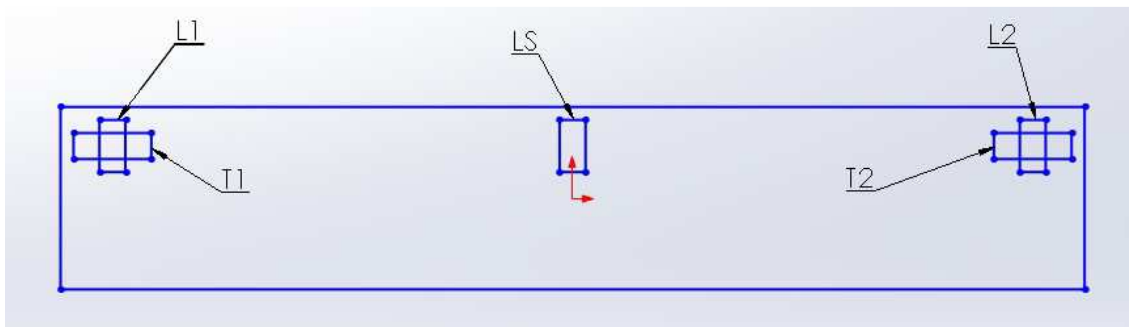


Figura 6.25 Esquema de la medida del parámetro Ra en la cara 1 del perfil 1

6.5.6 Medidas

Para la medida de la rugosidad hemos utilizado el rugosímetro que presentamos en el apartado 6.4.5 anterior y hemos seguido la metodología de ensayos también descrita en este apartado. A continuación vamos a presentar los valores obtenidos en cada una de las secciones medidas.

Perfil 1 - Cara 1

SECCIÓN	PARÁMETRO	1	2	3	4	5	6	Media
Transversal 1 (T1)	Ra	1.48	1.38	1.31	1.33	1.35	1.32	1,36
Transversal 2 (T2)	Ra	1.42	1.41	1.41	1.42	1.42	1.41	1,41
Longitudinal 1 (L1)	Ra	3,83	3,77	3,71	3,75	3,55	3,65	3,71
Longitudinal 2 (L2)	Ra	2,83	2,84	2,88	2,94	2,94	3,00	2,90
Unión (LS)	Ra	1,70	1,75	1,79	1,79	1,77	1,75	1,75

Tabla 6.1 Medida de Ra sobre la cara 1 del perfil 1

Perfil 1 - Cara 2

SECCIÓN	PARÁMETRO	1	2	3	4	5	6	Media
Transversal 1 (T1)	Ra	0.68	0.69	0.70	0.69	0.69	0.69	0,69
Transversal 2 (T2)	Ra	0.77	0.74	0.77	0.78	0.77	0.78	0,76
Longitudinal 1 (L1)	Ra	3,70	3,69	3,67	3,69	3,70	3,67	3,68
Longitudinal 2 (L2)	Ra	2,77	2,76	2,76	2,74	2,70	2,70	2,73
Unión (LS)	Ra	0,97	0,97	0,98	0,97	0,97	0,98	0,97

Tabla 6.2 Medida de Ra sobre la cara 2 del perfil 1

Perfil 2 - Cara 1

SECCIÓN	PARÁMETRO	1	2	3	4	5	6	Media
Transversal 1 (T1)	Ra	18.41	18.40	18.40	18.41	18.41	18.40	18,40
Transversal 2 (T2)	Ra	16.27	16.26	16.27	16.27	16.28	16.27	16,27
Longitudinal 1 (L1)	Ra	2,17	2,19	2,21	2,22	2,23	2,24	2,21
Longitudinal 2 (L2)	Ra	1,70	1,71	1,71	1,71	1,72	1,71	1,71

Tabla 6.3 Medida de Ra sobre la cara 1 del perfil 2

Perfil 2 - Cara 2

SECCIÓN	PARÁMETRO	1	2	3	4	5	6	Media
Transversal 1 (T1)	Ra	17.38	17.37	17.34	17.32	17.26	17.24	17,31
Transversal 2 (T2)	Ra	17.72	17.71	17.69	17.70	17.69	17.68	17,69
Longitudinal 1 (L1)	Ra	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Longitudinal 2 (L2)	Ra	1,78	1,78	1,77	1,77	1,76	1,75	1,76

Tabla 6.4 Medida de Ra sobre la cara 2 del perfil 2

Todas las medias obtenidas las truncamos al segundo decimal.

6.5.7 Conclusiones

Una vez obtenidos estos datos de rugosidad podemos sacar algunas conclusiones y también verificar datos que ya conocíamos.

El perfil 1 sabíamos que había sido fabricado horizontalmente y a través de estas medidas de rugosidad hemos visto como efectivamente está fabricado en este sentido y en la dirección de la envergadura y no en la de la cuerda. Esto lo deducimos ya que los valores del parámetro Ra son mayores en la dirección de la cuerda que en la perpendicular a esta.

El perfil 2 había sido fabricado en dirección vertical. Y observando y con las medidas de rugosidad verificamos también como había sido fabricado. Este se ha construido verticalmente, dibujando inicialmente la forma de la sección y rellenándola en diagonal. Y así una capa tras otra hasta llegar al valor de envergadura específico de nuestro perfil.

Esto lo deducimos por dos motivos. El primero es que los valores de rugosidad son mayores en el sentido de la envergadura que en el de la cuerda. Y el segundo es que los valores de rugosidad de la zona 1 (la inicial), sea cual sea la dirección de la medida, son mayores que los de la zona 2 (final). Lo que deducimos que se ha producido por el peso del propio material durante la fabricación y nos permite comprobar que el perfil ha sido fabricado verticalmente.

Por último, podemos notar como las medidas de rugosidad del perfil 1 son de un orden mayor que las del perfil 2. Esto es debido, como justificamos en la tabla 4.2 del capítulo 4, porque el material de diseño utilizado tiene poca consistencia en dirección vertical. Esto influirá en la entrada en pérdida de los perfiles y en los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre obtenidos.

Capítulo 7. Resultados y conclusiones

7.1 Introducción

7.2 Medida de fuerzas aerodinámicas

7.2.1 Fuerzas aerodinámicas

7.2.2 Coeficientes adimensionales

7.3 Comparación de los resultados de los dos perfiles

7.4 Comparación de resultados con datos de referencia

7.5 Conclusiones

7.1 Introducción

En este capítulo final vamos a presentar las medidas de fuerzas aerodinámicas tomadas sobre los perfiles fabricados, que era el objetivo inicial del trabajo.

Además estas medidas al ser comparadas con los datos de referencia, nos van a permitir evaluar la calidad de cada uno de los perfiles. Y si la calidad fuera adecuada, si sería interesante la fabricación de otros perfiles de geometrías más complejas.

También vamos a poder comprobar si las diferencias en rugosidad entre los dos perfiles aerodinámicos fabricados son significativas. Y en función de esto determinaremos que impresora y qué modo de fabricación son los más adecuados para la fabricación de futuros perfiles.

7.2 Medida de fuerzas aerodinámicas

En este apartado vamos a exponer los resultados de los ensayos de medida de fuerzas sobre los perfiles aerodinámicos bidimensionales que anteriormente habíamos fabricado.

Se procedió a la colocación de la balanza junto con el perfil en el interior de la sección de ensayo para la adquisición de las medidas.

Las medidas se realizaron para un amplio rango de ángulos los cuales oscilan entre -7° hasta 17° variando en 1° cada medida, y para unos regímenes de giro del ventilador de 20, 30 y 40 Hz.

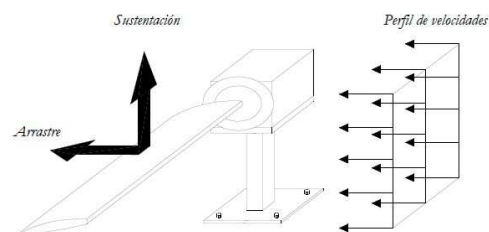


Figura 7.1 Esquema de las fuerzas medidas en la balanza

Para llevar a cabo las siguientes pruebas en el laboratorio de ensayos y a para los posteriores cálculos y acondicionamiento de los resultados obtenidos, se han realizados las siguientes consideraciones:

1. Los datos obtenidos por pantalla en la balanza aerodinámica no son fijos, sino que oscilan en un intervalo que aumenta conforme el ángulo de ataque también lo hace. Esto es consecuencia de la vibración presente en el perfil, que se hace mucho más notable para ángulos de ataque elevados y que nos impide tener una lectura estable de los valores de las fuerzas aerodinámicas. Para el cálculo de nuestras gráficas tomaremos un valor intermedio dentro del rango que nos da la balanza aerodinámica.

2. Los ensayos tiene una duración aproximada de entre una y dos horas. Tomamos los datos de las condiciones ambientales al comienzo y a la conclusión de cada prueba, notando que las variaciones son siempre mínimas. Por lo que para el cálculo de la densidad del aire vamos a utilizar las condiciones medidas al comienzo de la prueba.

3. Las distintas pruebas con los dos perfiles están realizadas a lo largo de cinco días, pero como ya comprobamos en el apartado 3.2.2 del capítulo 3 y más concretamente en la figura 3.10, las variaciones en las condiciones ambientales apenas tenían influencia en el cálculo de las velocidades obtenidas en la sección de ensayos. Por lo que la prueba para obtener dichas velocidades realizada el primero de los días la consideraré válida para todas las pruebas que se detallan a continuación. Únicamente introduciendo el valor de densidad concreto de cada ensayo, para así obtener una mayor exactitud en los resultados.

Programa de ensayos

Suponemos que el perfil fabricado es perfectamente simétrico y que por tanto para ángulo de ataque 0 la sustentación es 0. Por lo que antes de comenzar la toma de medidas tenemos que ajustar nuestro perfil a ángulo de ataque nulo. Esto lo hacemos como explicamos a continuación:

1. Montaje del sistema de medida de fuerzas aerodinámicas
2. Ajuste del perfil aerodinámico a ángulo de ataque 0°
3. Puesta en marcha del túnel aerodinámico
4. Comprobación que el valor de sustentación es 0 N

Si no es así,

5. Apagamos el túnel
6. Modificamos el ángulo de ataque
7. Y ponemos en marcha el túnel

Repetimos esta secuencia hasta que el valor de la sustentación sea 0. Una vez fijado el punto inicial, tomamos medidas en el rango que antes hemos especificado.

Para la toma de medidas seguimos la siguiente secuencia:

1. Medida de las condiciones ambientales
2. Fijamos el ángulo de ataque
3. Ajustamos a 0 los valores de sustentación y arrastre
4. Ponemos en marcha el túnel aerodinámico
5. Tomamos la medida de sustentación y arrastre

6. Apagamos el túnel
7. Modificamos el ángulo de ataque
8. Volvemos a ajustar a 0 los valores de sustentación y arrastre (en caso de que se hayan desajustado)
9. Tomamos la nueva medida
10. Repetimos el proceso hasta tener la totalidad de las medidas
11. Medida de las condiciones ambientales

Tenemos que tener en cuenta que para cada ajuste del ángulo de ataque tenemos que apagar el túnel, ya que al modificar el ángulo el perfil queda suelto y podría desprenderse alguna pieza del mismo y dañar el túnel. Por lo que seguimos la recomendación especificada en DELTALAB (2015) y siempre que modifiquemos el ángulo de ataque lo hacemos con el túnel apagado

7.2.1 Fuerzas aerodinámicas

En las figuras 7.2 y 7.3 podemos ver como varía la sustentación con el ángulo de ataque del perfil respecto a la corriente incidente. Vemos como para un valor de entre 13 y 14 grados el perfil entra en pérdida y el valor de la sustentación disminuye. También apreciamos como la sustentación aumenta conforme el número de Reynolds también lo hace.

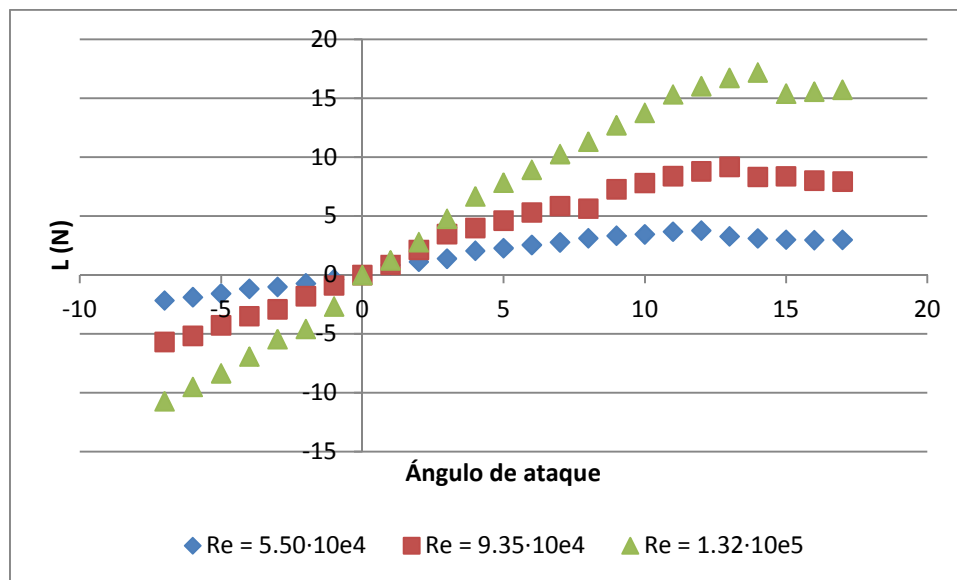


Figura 7.2 Sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 1

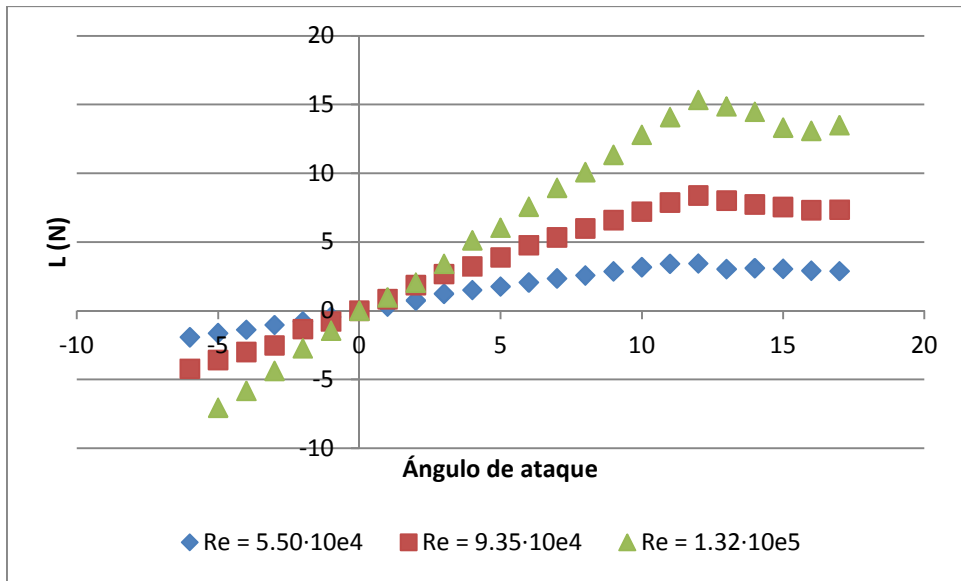


Figura 7.3 Sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 2

En las figuras 7.4 y 7.5 observamos la zona central en la que el arrastre se mantiene estable. Cuando el perfil entra en pérdida, se aprecia como el valor del arrastre comienza a aumentar.

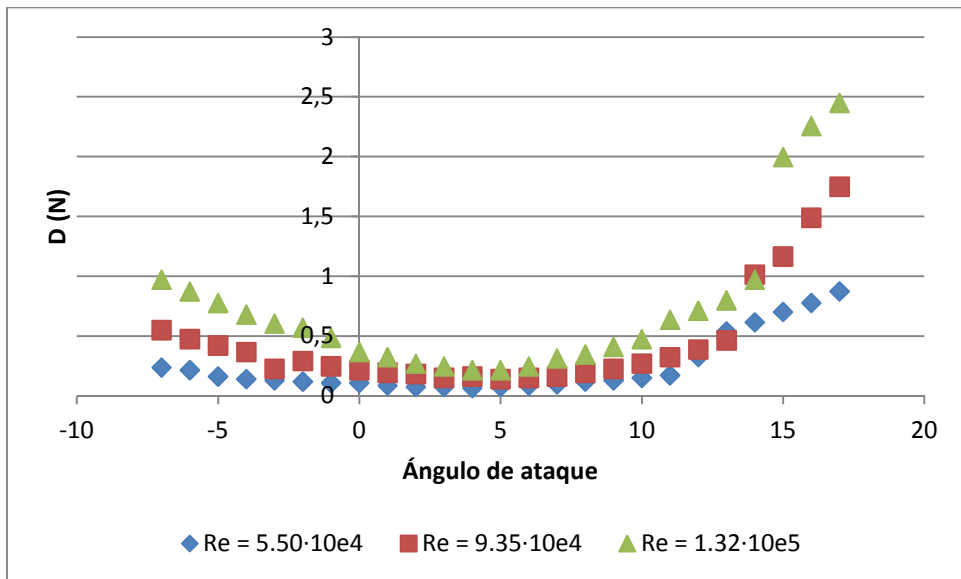


Figura 7.4 Arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 1

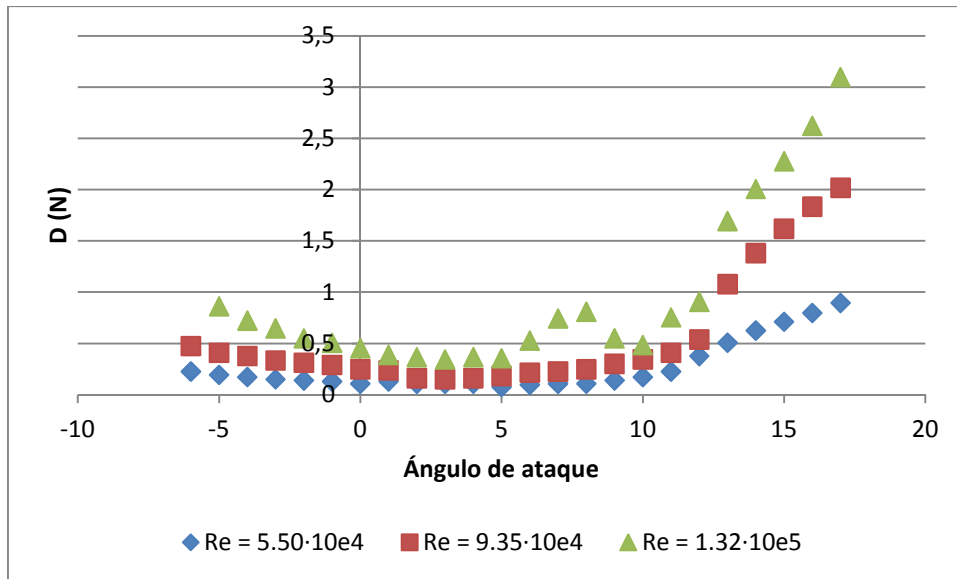


Figura 7.5 Arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 2

7.2.2 Coeficientes adimensionales

En las figuras 7.6 y 7.7 presentamos la fuerza de sustentación adimensionalizada, es decir, C_L . El valor del coeficiente de sustentación debería ser el mismo para los tres ensayos realizados a diferentes números de Reynolds.

Los ensayos realizados con número de Reynolds superior, presentan una curva prácticamente idéntica. En cambio, la prueba realizada con el valor del Reynolds más bajo se diferencia de las otras dos. Esto es común a los ensayos realizados con los dos perfiles.

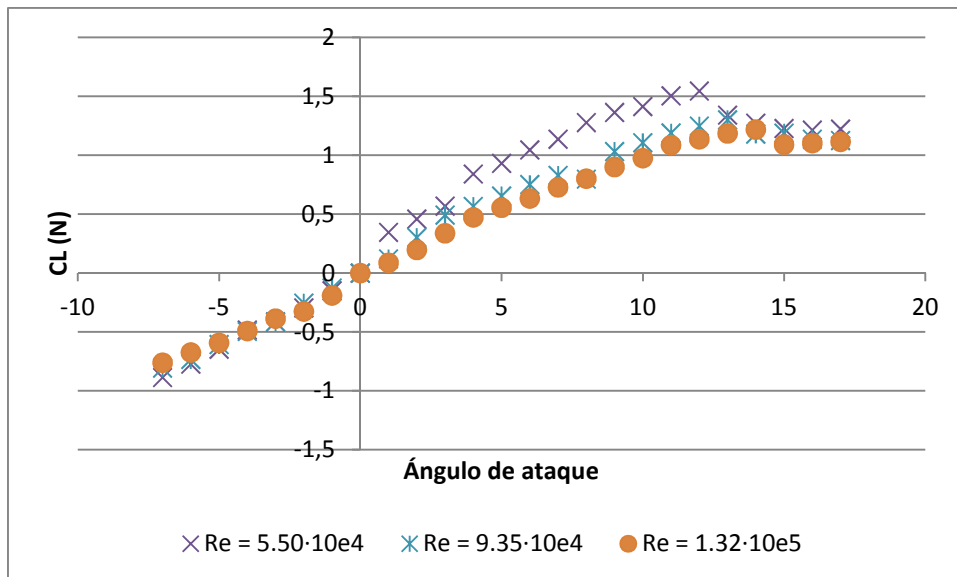


Figura 7.6 Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 1

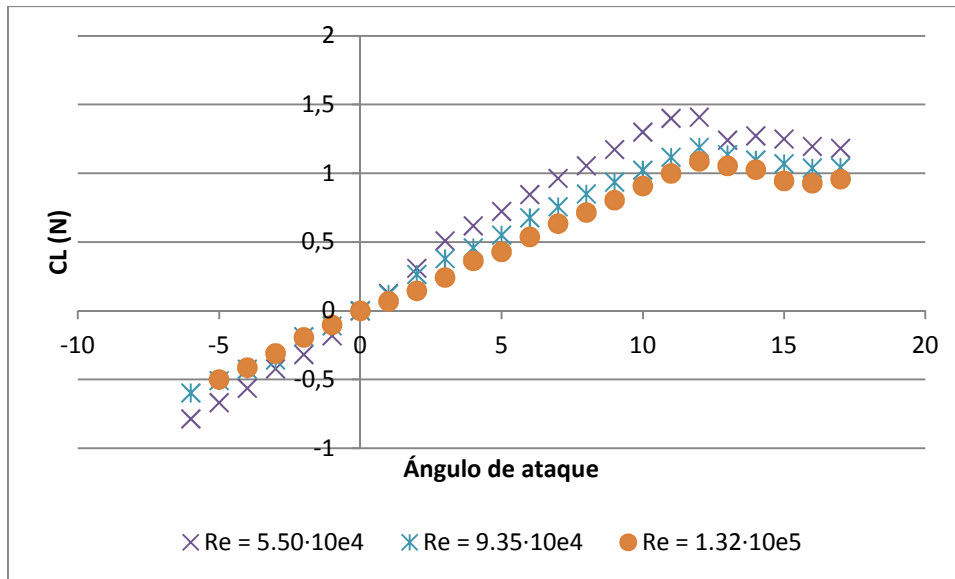


Figura 7.7 Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 2

En las figuras 7.8, 7.9 presentamos el valor del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque. Y en las figuras 7.10 y 7.11 la curva polar, que es la representación del coeficiente de sustentación frente al de arrastre. En estas cuatro figuras vemos como las curvas obtenidas a distintos números de Reynolds son prácticamente idénticas mientras el perfil no ha entrado en pérdida. Una vez que lo ha hecho los datos obtenidos son dispersos y no presentan coincidencia los de las distintas pruebas entre sí, situación que sin comparar con datos de referencia tiene sentido ya que la curva polar varía con el números de Reynolds.

La dispersión de nuestros datos cuando el perfil entra en pérdida es debido a que cuando el perfil entra en pérdida, la vibración que se genera en el es muy elevada. Dando lugar a un alto error en la toma de la medida.

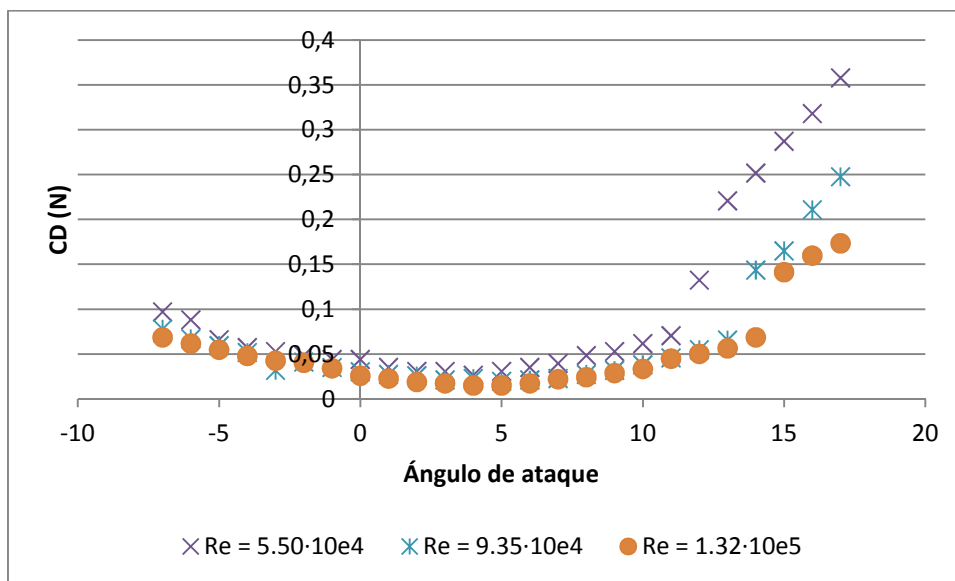


Figura 7.8 Coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 1

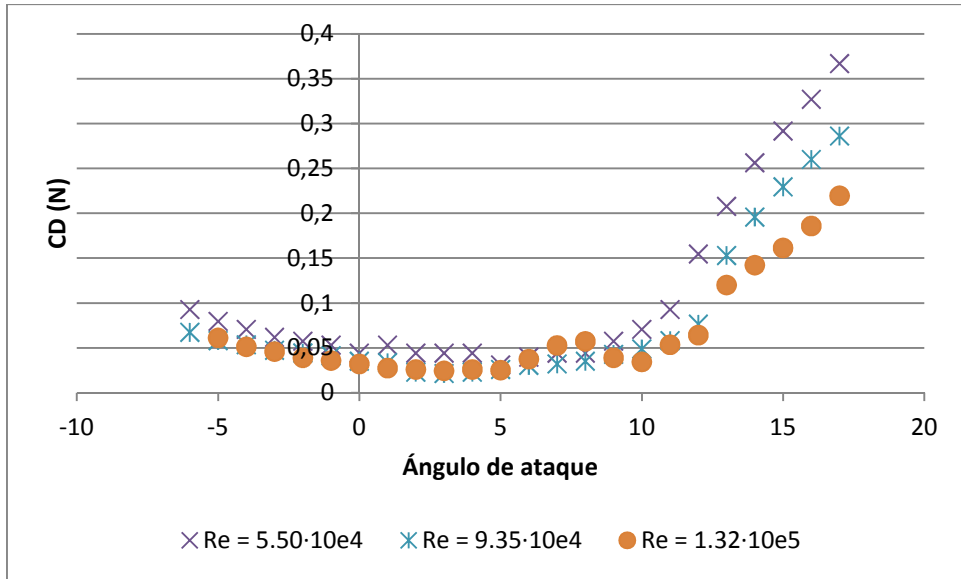


Figura 7.9 Coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 2

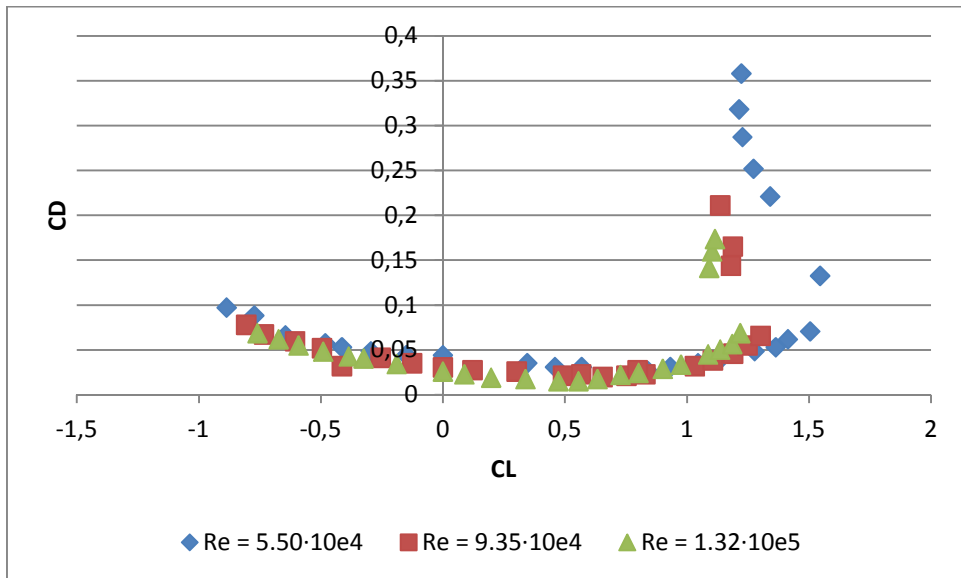


Figura 7.10 Curva polar en el perfil 1

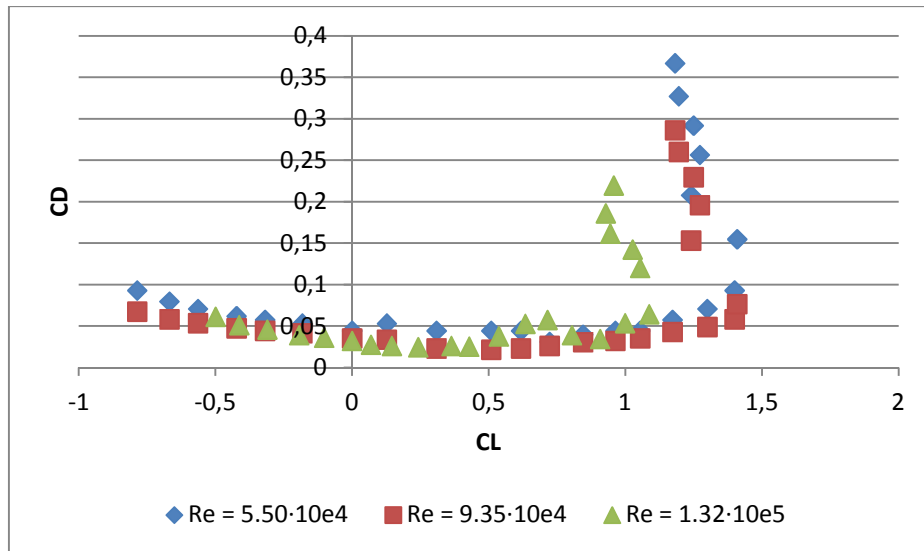


Figura 7.11 Curva polar en el perfil 2

7.3 Comparación de los resultados de los dos perfiles

En el apartado anterior comprobábamos que las pruebas realizadas con el número de Reynolds más bajo diferían de las otras dos pruebas realizadas.

En la figura 7.12 comparamos las tres curvas del coeficiente de sustentación de los dos perfiles ensayados. Y comprobamos que no todas las curvas obtenidas son iguales, como debería de ser. Y vemos como este problema se acentúa conforme aumentamos el ángulo de ataque del perfil.

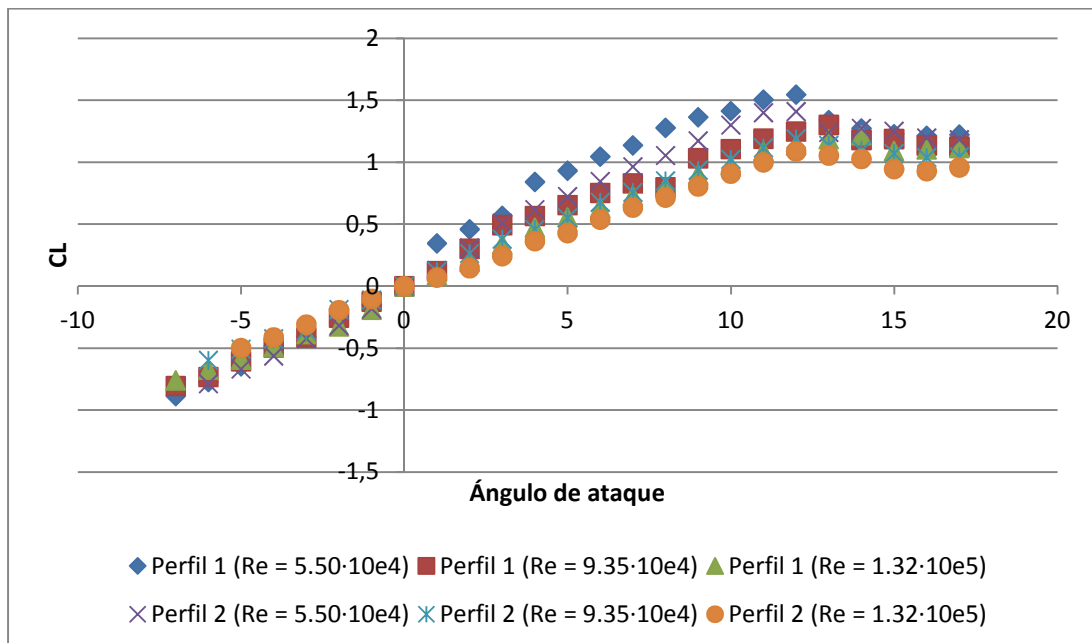


Figura 7.12 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque de los dos perfiles

En las figuras 7.13 y 7.14 hemos comparado todas las curvas del coeficiente de arrastre y las polares, obtenidas en cada uno de los perfiles.

Observamos como para la región en la que el perfil aún no ha entrado en pérdida, las curvas son muy similares. En cambio, y como ya comentamos en el apartado anterior, una vez que el perfil entra en pérdida los valores obtenidos son muy altos y dispersos. Debido esto último a la fuerte vibración producida en los perfiles para estos valores del ángulo de ataque.

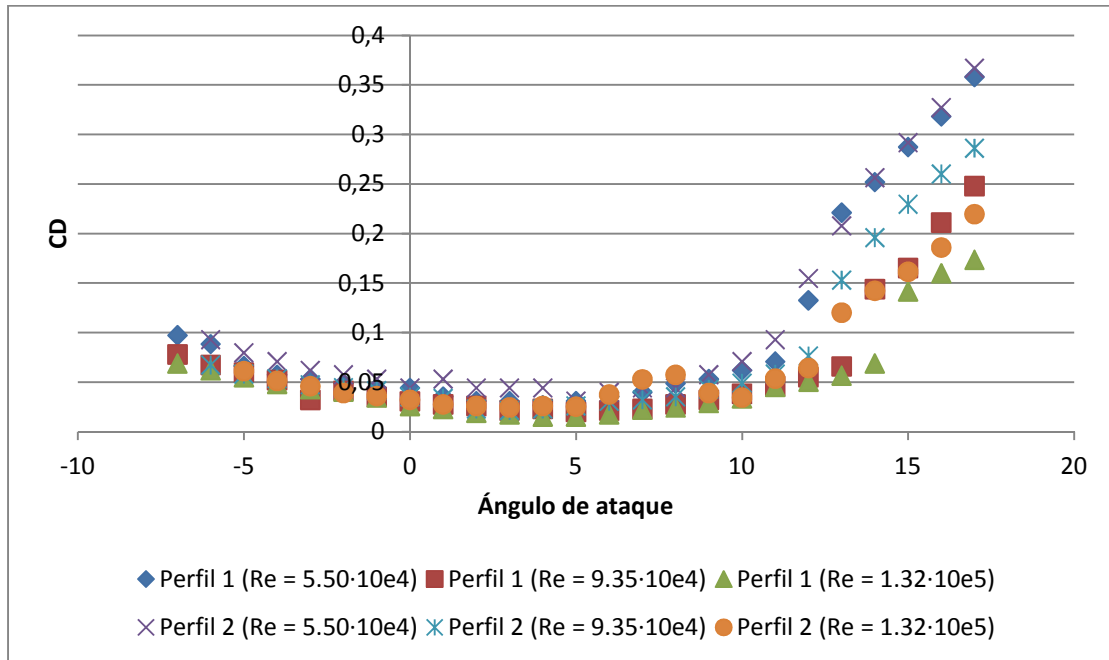


Figura 7.13 Comparación del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque de los dos perfiles

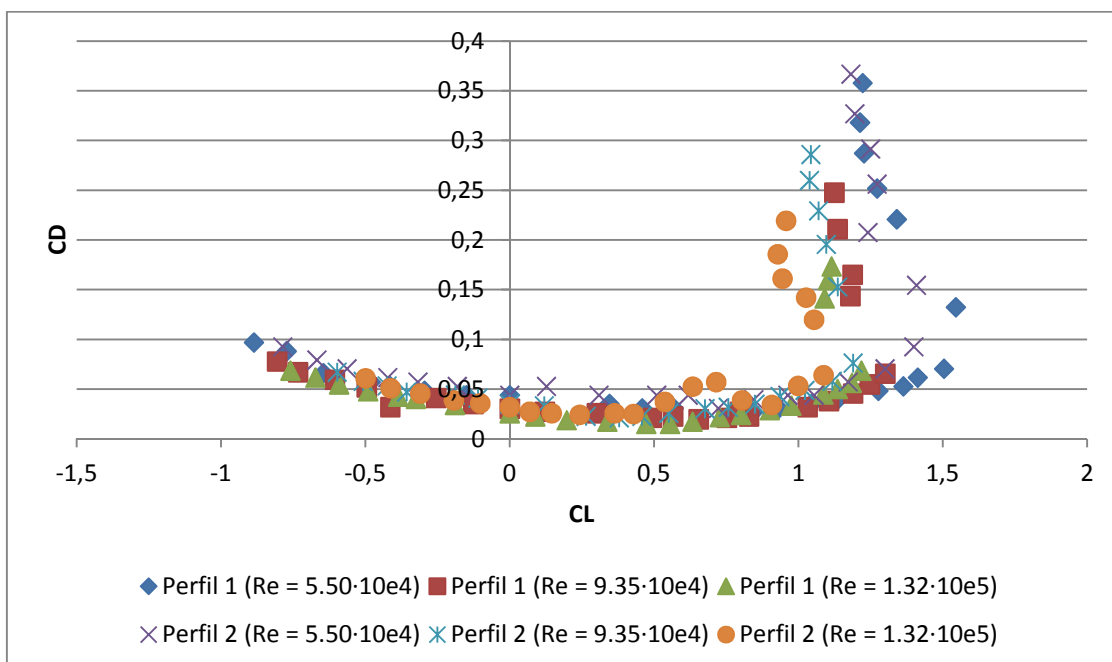


Figura 7.14 Comparación de la curva polar de los dos perfiles

7.4 Comparación de resultados con datos de referencia

En las figuras 7.15 y 7.16 comparamos las curvas del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque obtenidas con las de referencia que se presentan en el ABBOTT & VON DOENHOFF (1959).

En estas dos figuras podemos ver como las curvas para $Re = 5.50 \cdot 10^4$ difieren bastante de los datos de referencia. En cambio el resto de curvas son bastante similares a las dos de referencia.

En la figura 7.15 observamos como la entrada en pérdida se encuentra entre la curva denominada "CL(rugosidad estándar)" y la denominada " C_L ($Re = 3 \cdot 10^6/Re = 6 \cdot 10^6/Re = 9 \cdot 10^6$)". Esto tiene sentido ya que la primera representa un perfil con una rugosidad muy superior a la de cualquier perfil fabricado y la segunda representa la curva de un perfil completamente liso.

Este mismo comportamiento los podemos ver en las curvas de la figura 7.16.

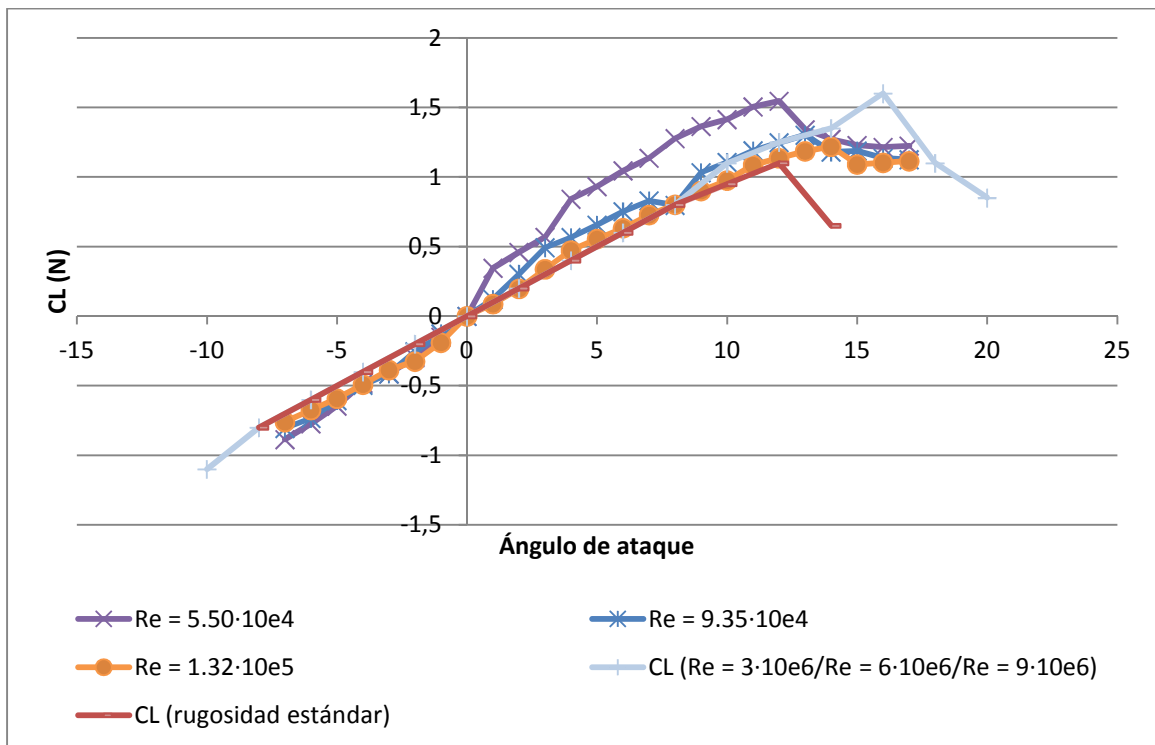


Figura 7.15 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 1 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

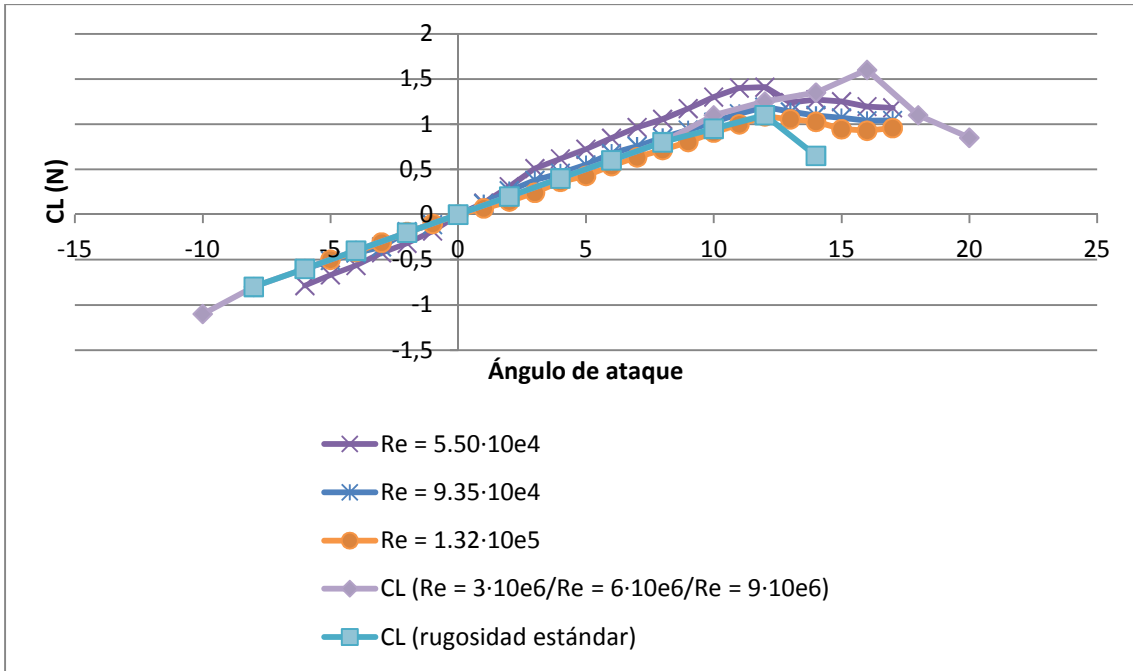


Figura 7.16 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 2 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

En las figuras 7.17 y 7.18 comparamos nuestras curvas del coeficiente de sustentación con otras que han sido obtenidas a través de ANSYS. Pero vemos que la concordancia no es correcta.

Los valores del parámetro Ra de las curvas obtenidas con ANSYS son superiores a los de nuestros perfiles, que presentamos en el apartado 6.5.6 del Capítulo 6. Por lo que la entrada en pérdida de nuestras curvas debería ser a un ángulo de ataque superior al mostrado en las curvas de ANSYS. Y no al contrario como vemos que sucede.

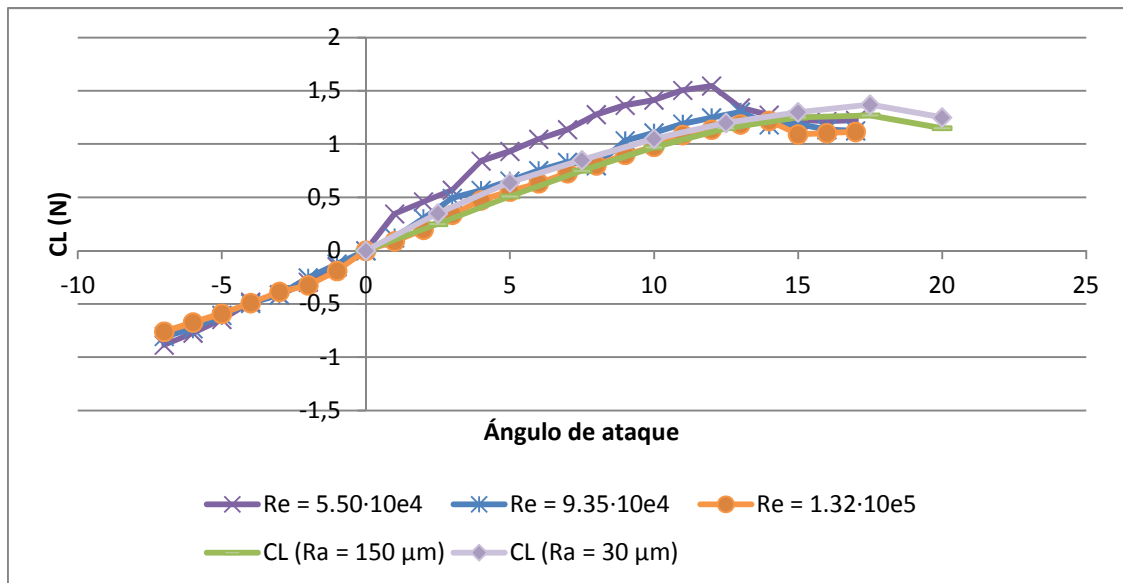


Figura 7.17 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 1 con los datos de MAHEL MOHAMMED (2008)

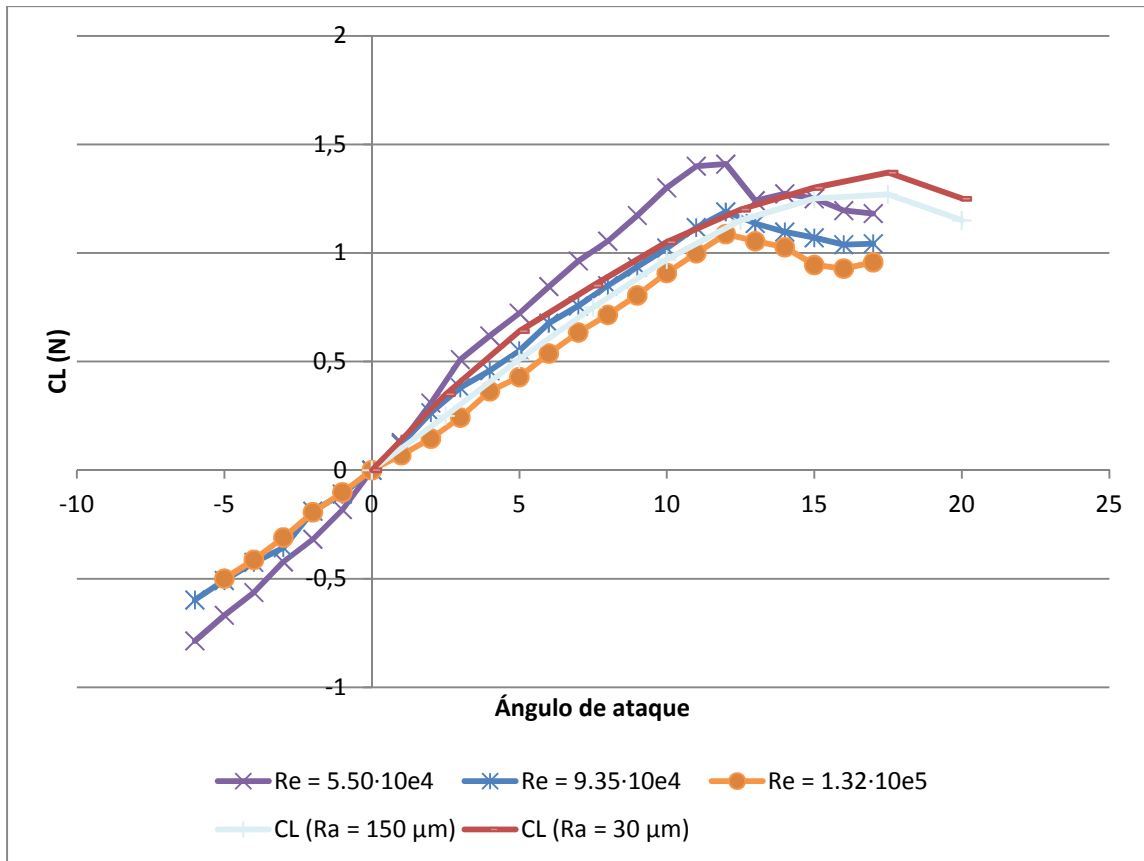


Figura 7.18 Comparación del coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque en el perfil 2 con los datos de MAHEL MOHAMMED (2008)

En las figuras 7.19 y 7.20 comparamos nuestras curvas del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque con las descritas en el ABBOTT & VON DOENHOFF (1959). Y en las figuras 7.21 y 7.22 las polares obtenidas en los ensayos con las descritas en la misma referencia que acabamos de citar.

Como se observa claramente, las cuatro figuras que acabamos de citar son de un orden superior a las que encontramos en la referencia citada. Esto nos da una idea de que la rugosidad de nuestros perfiles tiene una mayor influencia en el arrastre que en la sustentación.

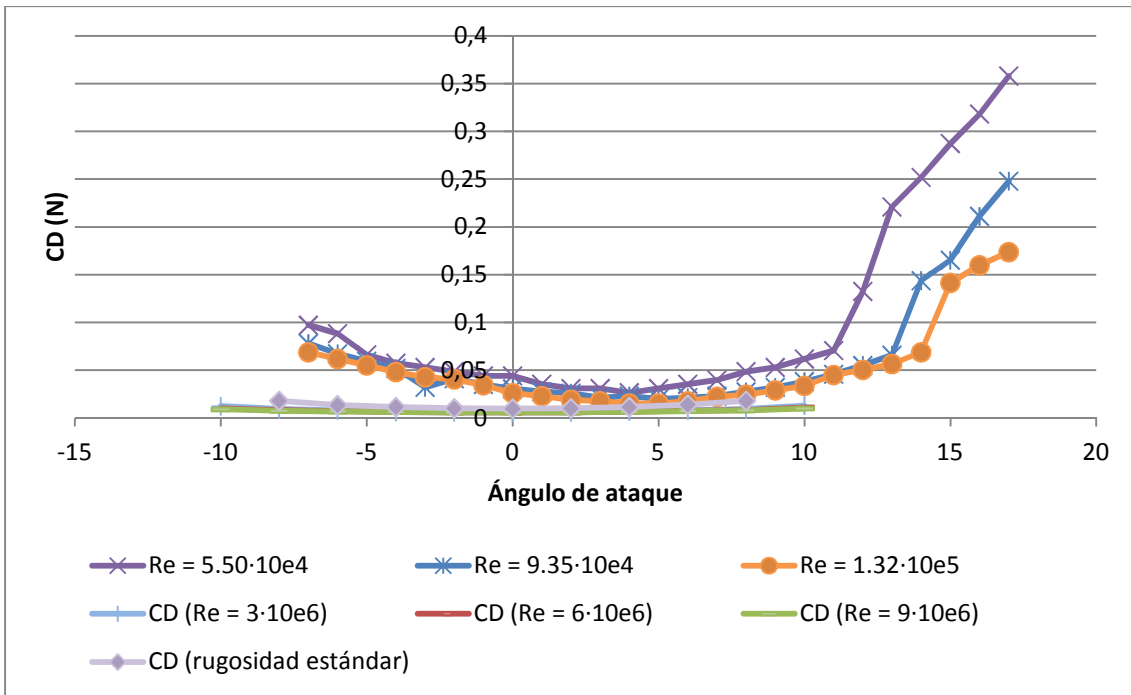


Figura 7.19 Comparación del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 1 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

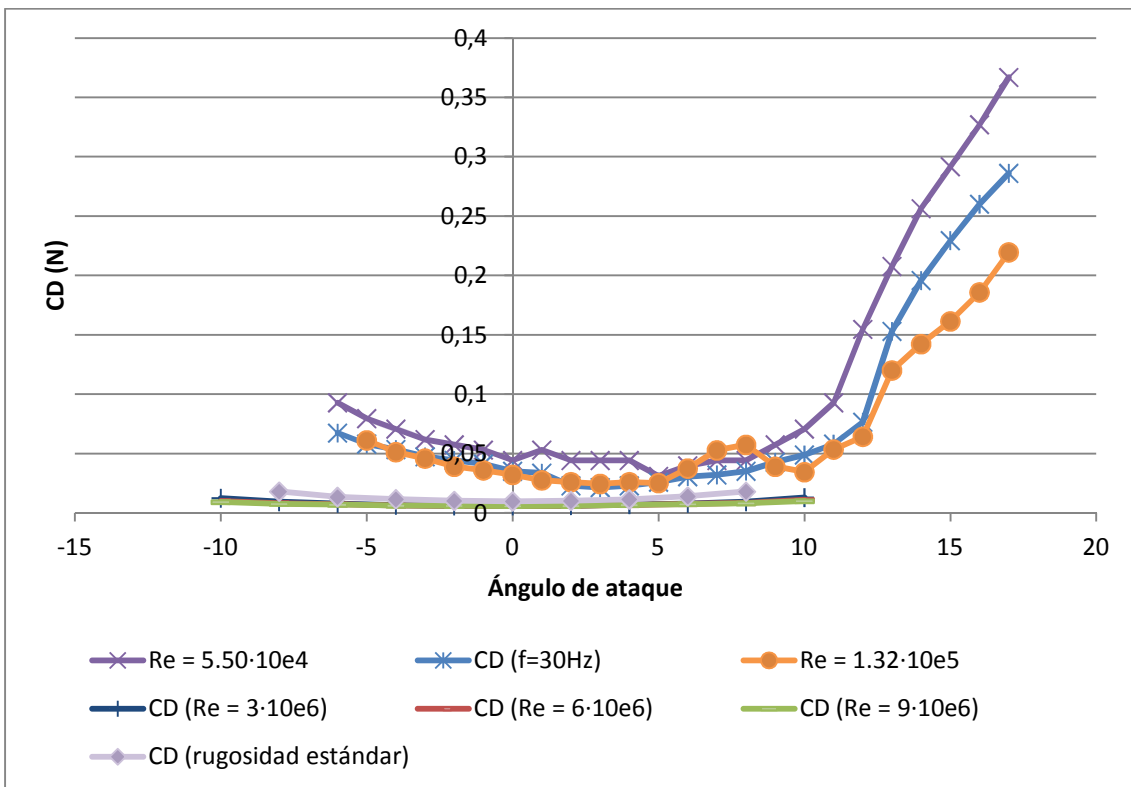


Figura 7.20 Comparación del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque en el perfil 2 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

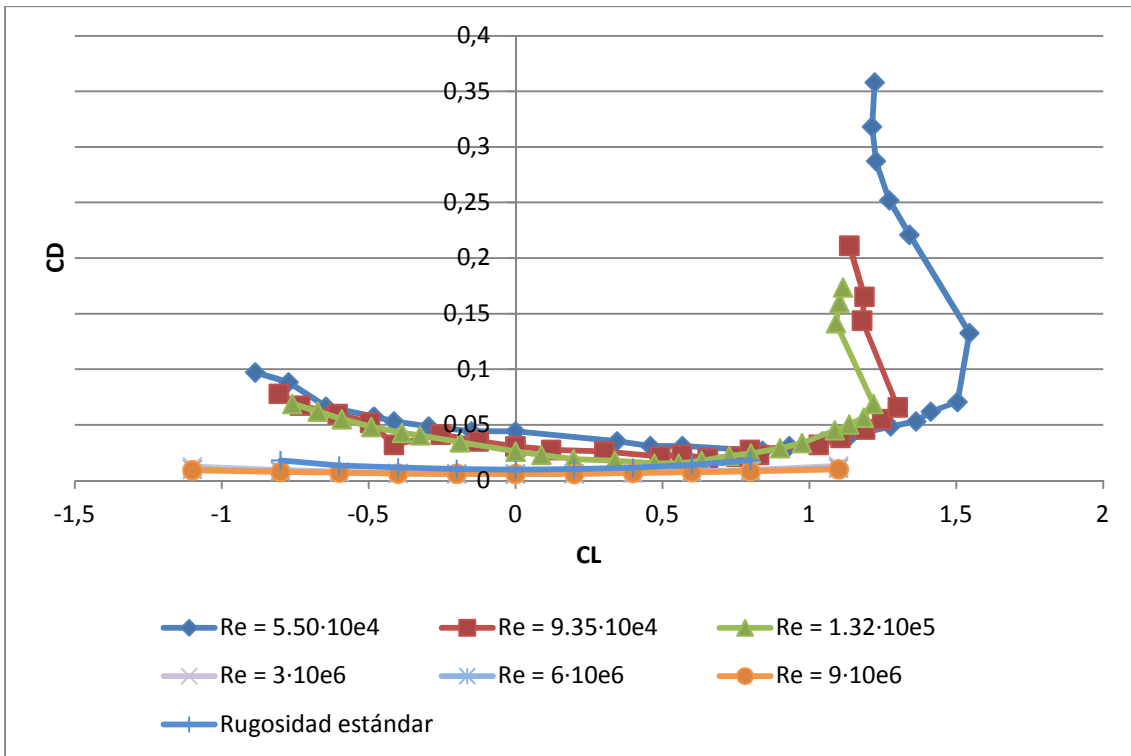


Figura 7.21 Comparación de la curva polar en el perfil 1 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

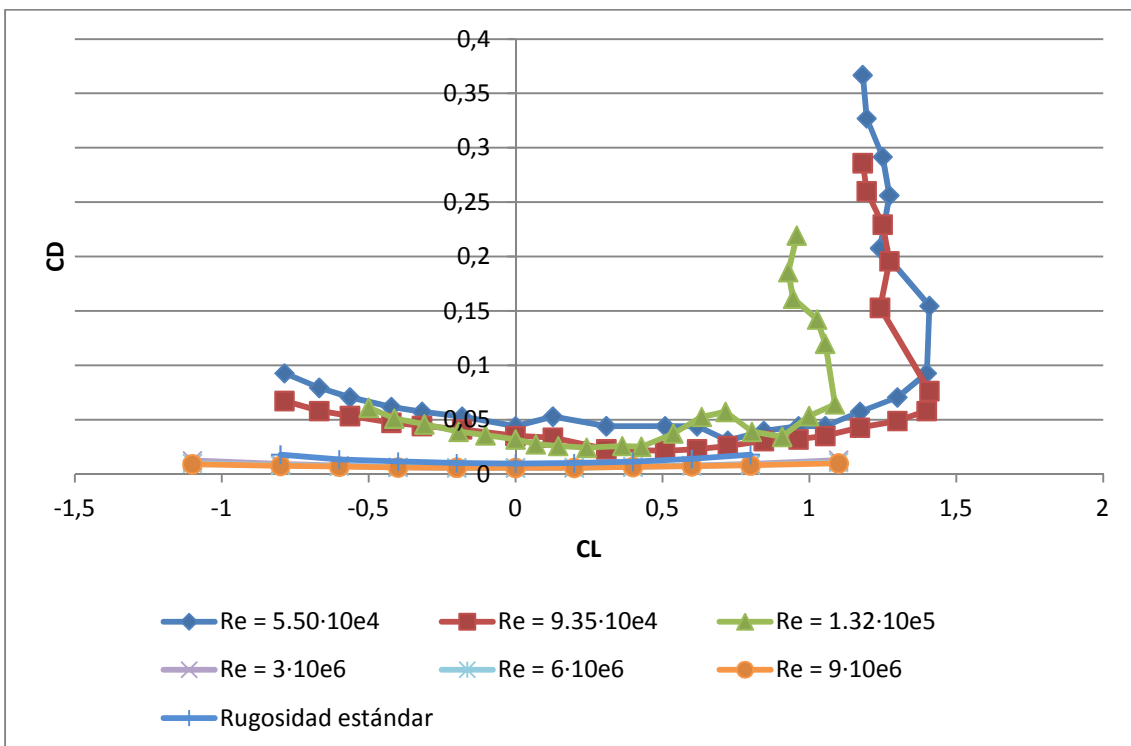


Figura 7.22 Comparación de la curva polar en el perfil 2 con los datos de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

7.5 Conclusiones

A lo largo del trabajo hemos ido desarrollando cada uno de los puntos que al principio del mismo detallábamos en los objetivos de la introducción. A continuación vamos a presentar cada uno de estos objetivos parciales y a comentar las conclusiones alcanzadas en cada uno ellos.

1) Ensayos de evaluación del flujo en la cámara de ensayos

Tras el traslado del túnel aerodinámico nos interesaba conocer si el perfil de velocidades medias continuaba siendo uniforme. Por lo que realizamos el correspondiente ensayo utilizando un tubo de Pitot y verificamos la uniformidad del flujo en la sección de ensayos.

También realizamos distintas pruebas de velocidades en la cámara de ensayos con el tubo de Pitot. Buscamos la influencia de la variación de las condiciones ambientales en las mismas. Llegando a la determinación de que durante los meses en los que se llevan a cabo los ensayos la variación de estas no es significativa. Por lo que obtenemos una representación de la velocidad en función de la frecuencia del ventilador del túnel que utilizaremos para todos los ensayos de medida de fuerzas realizados.

2) Fabricación de los perfiles aerodinámicos

Producimos dos perfiles NACA 0012 con impresoras 3D. Uno lo realizamos en dos partes en la instalaciones de la universidad y otro lo obtenemos de una sola pieza a través de una empresa externa. Los perfiles los obtenemos de un diseño previo realizado con un programa de CAD.

Realizamos medidas de rugosidad sobre ambos, determinando que esta es de un orden superior en el perfil fabricado en una parte. Siendo este perfil más consistente que el fabricado en dos partes, aunque su acabado superficial sea menos fino.

Además verificamos el modo de construcción de cada uno de los perfiles a través de las medidas de rugosidad. Estando el perfil en dos partes fabricado en horizontal y el de una pieza en vertical.

Parte del motivo por el que la rugosidad en el perfil obtenido en una pieza sea tan superior es que haya sido fabricado en vertical. Ya que el material empleado presenta poca consistencia en dirección vertical. Esto hace que el peso del propio material influya sobre las primeras capas depositadas, juntáolas más y produciendo un surco mayor.

3) Medida de fuerzas aerodinámicas

Los perfiles fabricados los hemos ensayado en el túnel aerodinámico. Para la medida de fuerzas sobre estos, hemos empleado una balanza aerodinámica que previamente hemos calibrado.

De estas pruebas de medida de fuerzas extraemos diferentes conclusiones:

- Vibración en los perfiles

Para los valores del ángulo de ataque en los que el perfil entra en pérdida, se produce una fuerte vibración en los perfiles. Esta no nos permite obtener un valor fijo de los valores de fuerzas ofrecidos por la balanza. Lo que nos hace cometer un error en la medida de las fuerzas para este rango de ángulos de ataque. Dando como resultado una dispersión en los datos medidos en esta zona sobre todo para el arrastre.

- Comparación de los resultados obtenidos en los dos perfiles

De comparar las curvas obtenidas en ambos perfiles observamos que estas son bastante similares, no habiendo grandes diferencias entre ellas. Salvo los valores en las curvas del coeficiente de arrastre y polares en los que el perfil ha entrado en pérdida.

También notamos que aunque las distintas curvas obtenidas para el coeficiente de sustentación deberían ser iguales, estas varían con el Reynolds. Resultado fruto de que los perfiles fabricados no tienen un acabado superficial totalmente liso.

- Comparación de los resultados con datos de referencia

Las curvas obtenidas para el coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque presentan gran similitud con las de los datos de referencia. En cambio las del coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque y la polar, aunque si se parecen en forma, presentan resultados de un orden mayor a los de los datos de referencia obtenidos del ABBOTT & VON DOENHOFF (1959).

Esto se debe a que estas dos últimas curvas si que dependen del número de Reynolds, aumentando sus valores conforme este disminuye. Por lo que teniendo en cuenta que los datos de referencia son obtenidos con números de Reynolds de uno y dos ordenes superiores a los de nuestros datos, podemos concluir que las distintas curvas del coeficiente de arrastre y las polares obtenidas son correctas.

- Valor de la rugosidad

Comparamos nuestras curvas del coeficiente de sustentación con otras obtenidas con ANSYS donde se nos especifica el valor del parámetro Ra que nosotros hemos medido en nuestros perfiles. Estas curvas de ANSYS son de perfiles NACA 0012 con valores de rugosidad mayores que los de los nuestros y aún así entran en pérdida para valores superiores del ángulo de ataque y ofrecen un C_L superior. Por lo tanto descartamos estas gráficas para la comparación

De la comparación del coeficiente de sustentación con las dos curvas del ABBOTT & VON DOENHOFF (1959) comprobamos que el valor de la rugosidad en nuestros perfiles es de aproximadamente la mitad del valor definido en este libro como "rugosidad estándar".

Como nuestras curvas del coeficiente de arrastre y polar son de distinto orden no podemos realizar las comparaciones pertinentes. Pero una vez que hemos verificado que son correctas, las conclusiones obtenidas para el coeficiente de sustentación son también válidas para estas curvas.

Conclusión final y futuros trabajos

Después de las distintas consideraciones realizadas, llegamos a la conclusión de que el perfil fabricado en el SAIT presenta mejores resultados que el obtenido a través de la empresa externa. La influencia de la unión realizada entre las dos partes no es significativa en comparación con el valor de rugosidad mostrado por el segundo perfil. Obteniendo mejores resultados en todas las curvas realizadas con el perfil del SAIT. Aún así ambos perfiles reproducen perfectamente los resultados encontrados en la bibliografía para un NACA 0012.

Por lo que finalmente, concluimos que la tecnología de impresión 3D es válida para reproducir perfiles aerodinámicos NACA 0012.

Queda para futuros trabajos reproducir el ensayo de arrastre para números de Reynolds superiores, que en este caso no se ha realizado por dos motivos:

- Limitaciones del túnel aerodinámico. Ya que con el no somos capaces de reproducir ensayos para valores del Reynolds similares a los del ABBOTT & VON DOENHOFF (1959).
- Vibraciones en el perfil. Para velocidades tan altas, las vibraciones podrían comprometer la estructura del perfil.

Bibliografía y Referencias

- ABBOTT, I. H. & VON DOENHOFF, A. E. (1959).** *Theory of Wing Sections*. New York: Dover Publications Inc.
- LEGAZ-GARCÍA, B. (2002).** *Diseño, construcción y puesta a punto de un túnel aerodinámico subsónico en aspiración*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena
- CANO-CERÓN, A. & PÉREZ-GARCÍA, J. (2002).** *Desarrollo de un procedimiento de ensayo para caracterización de elementos singulares en flujo compresible estacionario. Obtención del coeficiente de pérdidas de presión en uniones de conductos*. Cartagena.
- DE CIURANA, Q. FERNÁNDEZ, A., & MONZÓN, M. (2006).** *Guía de Tecnologías de Rapid Manufacturing*. Girona: Edicions a Petició S.L.
- CRESPO, A. (2006).** *Mécanica de Fluidos*. Madrid: Paraninfo.
- DELTALAB. (2015).** *Manual balanza aerodinámica*.
- DIMENSION. (2015).** *Manual impresora Dimension bst 1200bs*.
- FORTUS. (2015).** *Manual impresora Fortus 400mc*.
- ISO. (1995).** *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Geneva.
- ISO-4287. (1997).** *Normativa medidas de rugosidad*.
- JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. (2008).** *ISO Guide to Uncertainty Measurement*.
- LA CROSSE TECHNOLOGY. (2013).** *Manual Estación meteorológica 9257*. España.
- LAFUENTE, M. & RODRÍGUEZ, J. (2010).** *Instalación experimental para caracterización de perfiles aerodinámicos*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- RONCERO, S. E., & JIMÉNEZ, F. G. (2009).** *Perfiles Aerodinámicos en Régimen Incompresible. En Aerodinámica del avión*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- SERRANO-ROCHEL, Á., & PÉREZ-GARCÍA, J. (2003).** *Evaluación de un túnel aerodinámico mediante anemometría de sensor térmico y puesta a punto de los equipos de medida de fuerzas aerodinámicas y visualización de flujos*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- STRATASYS. (2015).** *Manual impresora Objet Polyjet*.
- STRATASYS. (2015).** *Polyjet material data sheet*.
- STRATASYS. (2015).** *Propiedades ABS y ABSplus*.

Publicaciones y artículos de investigación:

MAHEL MOHAMMED, F. (2008). Influence of surface roughness on the dynamic stall of a rotary wing section in subsonic flow.

Journal of *Al-Rafidain University College For Sciences*, nº22 , 92-115.

Información disponible en la red:

AIRFOIL TOOLS. (2015). Recuperado el Abril de 2015, de
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>

BASILISCUS. (2015). Recuperado el Marzo de 2015, de
<http://www.basiliscus.com/ProaSections/AppendixD/TableD1.txt>

GRUPO TECNOLOGÍA MECÁNICA - PROCESOS DE FABRICACIÓN. (2015). *Rugosidad Superficial.*
Recuperado el Septiembre de 2015, de
<http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>

LEDNICER, D. (2015). *The incomplete Guide to Airfoil Usage.* Recuperado el Septiembre de 2015, de
<http://www.ae.uiuc.edu/m-selig/ads/aircraft.html>

PROPIEDADES ABS. (2015). Recuperado el Junio de 2015, de
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=eb7a78f5948d481c9493a67f0d089646>

SELIG, M. (2015). *UIUC Airfoil Data Site.* Recuperado el Septiembre de 2015, de
<http://www.ae.uiuc.edu/m-selig/ads.html>

TRECEM-WIRE PRODUCTS S.A. (2015). Recuperado el Abril de 2015, de
<http://www.trecem.es>

UPV/EHU. (2014). *Metrología del acabado superficial.* Recuperado el Septiembre de 2015, de
http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/745_ca.pdf

WIKIPEDIA. (2 de Abril de 2015). *Perfil Alar.* Recuperado el Agosto de 2015, de
https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar

Anexos

Anexo I. Coordenadas NACA 0012

Anexo II. Características de las impresoras 3D empleadas

Anexo III. Datos de los ensayos de medida de fuerzas aerodinámicas

Anexo IV. Datos de referencia de fuerzas aerodinámicas

Anexo V. Planos de los perfiles aerodinámicos

Anexo I. Coordenadas NACA 0012

X/c	Y/c	X/c	Y/c	X/c	Y/c
1,0000000	0,0012600	0,1545960	0,0539090	0,1890110	-0,0566920
0,9927040	0,0022740	0,1378520	0,0521380	0,2065440	-0,0577330
0,9796410	0,0040790	0,1215480	0,0500980	0,2242360	-0,0585620
0,9642440	0,0061690	0,1058270	0,0477850	0,2420600	-0,0591910
0,9472310	0,0084340	0,0909030	0,0452200	0,2599970	-0,0596340
0,9293230	0,0107650	0,0770390	0,0424490	0,2780330	-0,0599030
0,9109560	0,0131010	0,0645410	0,0395480	0,2961590	-0,0600090
0,8923720	0,0154200	0,0535940	0,0366120	0,3143660	-0,0599650
0,8737230	0,0177000	0,0442110	0,0337170	0,3326480	-0,0597790
0,8550410	0,0199310	0,0362540	0,0309130	0,3509890	-0,0594620
0,8363110	0,0221190	0,0295670	0,0282180	0,3693720	-0,0590230
0,8175580	0,0242660	0,0239820	0,0256530	0,3877890	-0,0584660
0,7988190	0,0263660	0,0193100	0,0232170	0,4062410	-0,0577960
0,7800880	0,0284140	0,0153710	0,0208710	0,4247400	-0,0570190
0,7613360	0,0304130	0,0120120	0,0185790	0,4432870	-0,0561440
0,7425600	0,0323700	0,0091170	0,0163160	0,4618750	-0,0551780
0,7237800	0,0342840	0,0066530	0,0140580	0,4804880	-0,0541270
0,7050120	0,0361490	0,0046210	0,0117970	0,4991170	-0,0529960
0,6862550	0,0379640	0,0030070	0,0095440	0,5177630	-0,0517860
0,6675020	0,0397280	0,0017770	0,0073180	0,5364300	-0,0505030
0,6487510	0,0414400	0,0008940	0,0051550	0,5551170	-0,0491490
0,6300040	0,0430980	0,0003220	0,0030590	0,5738210	-0,0477280
0,6112660	0,0447010	0,0000360	0,0010140	0,5925380	-0,0462450
0,5925380	0,0462450	0,0000360	-0,0010140	0,6112660	-0,0447010
0,5738210	0,0477280	0,0003220	-0,0030590	0,6300040	-0,0430980
0,5551170	0,0491490	0,0008940	-0,0051550	0,6487510	-0,0414400
0,5364300	0,0505030	0,0017770	-0,0073180	0,6675020	-0,0397280
0,5177630	0,0517860	0,0030070	-0,0095440	0,6862550	-0,0379640
0,4991170	0,0529960	0,0046210	-0,0117970	0,7050120	-0,0361490
0,4804880	0,0541270	0,0066530	-0,0140580	0,7237800	-0,0342840
0,4618750	0,0551780	0,0091170	-0,0163160	0,7425600	-0,0323700
0,4432870	0,0561440	0,0120120	-0,0185790	0,7613360	-0,0304130
0,4247400	0,0570190	0,0153710	-0,0208710	0,7800880	-0,0284140
0,4062410	0,0577960	0,0193100	-0,0232170	0,7988190	-0,0263660
0,3877890	0,0584660	0,0239820	-0,0256530	0,8175580	-0,0242660
0,3693720	0,0590230	0,0295670	-0,0282180	0,8363110	-0,0221190
0,3509890	0,0594620	0,0362540	-0,0309130	0,8550410	-0,0199310
0,3326480	0,0597790	0,0442110	-0,0337170	0,8737230	-0,0177000
0,3143660	0,0599650	0,0535940	-0,0366120	0,8923720	-0,0154200
0,2961590	0,0600090	0,0645410	-0,0395480	0,9109560	-0,0131010

0,2780330	0,0599030	0,0770390	-0,0424490	0,9293230	-0,0107650
0,2599970	0,0596340	0,0909030	-0,0452200	0,9472310	-0,0084340
0,2420600	0,0591910	0,1058270	-0,0477840	0,9642440	-0,0061690
0,2242360	0,0585620	0,1215480	-0,0500980	0,9796410	-0,0040790
0,2065440	0,0577330	0,1378520	-0,0521380	0,9927040	-0,0022740
0,1890110	0,0566920	0,1545960	-0,0539090	1,0000000	-0,0012600
0,1716760	0,0554210	0,1716760	-0,0554210		

Tabla I.1 Coordenadas del NACA 0012

X	Y	X	Y	X	Y
75,0000000	0,0945000	11,5947000	4,0431750	14,1758250	-4,2519000
74,4528000	0,1705500	10,3389000	3,9103500	15,4908000	-4,3299750
73,4730750	0,3059250	9,1161000	3,7573500	16,8177000	-4,3921500
72,3183000	0,4626750	7,9370250	3,5838750	18,1545000	-4,4393250
71,0423250	0,6325500	6,8177250	3,3915000	19,4997750	-4,4725500
69,6992250	0,8073750	5,7779250	3,1836750	20,8524750	-4,4927250
68,3217000	0,9825750	4,8405750	2,9661000	22,2119250	-4,5006750
66,9279000	1,1565000	4,0195500	2,7459000	23,5774500	-4,4973750
65,5292250	1,3275000	3,3158250	2,5287750	24,9486000	-4,4834250
64,1280750	1,4948250	2,7190500	2,3184750	26,3241750	-4,4596500
62,7233250	1,6589250	2,2175250	2,1163500	27,7029000	-4,4267250
61,3168500	1,8199500	1,7986500	1,9239750	29,0841750	-4,3849500
59,9114250	1,9774500	1,4482500	1,7412750	30,4680750	-4,3347000
58,5066000	2,1310500	1,1528250	1,5653250	31,8555000	-4,2764250
57,1002000	2,2809750	0,9009000	1,3934250	33,2465250	-4,2108000
55,6920000	2,4277500	0,6837750	1,2237000	34,6406250	-4,1383500
54,2835000	2,5713000	0,4989750	1,0543500	36,0366000	-4,0595250
52,8759000	2,7111750	0,3465750	0,8847750	37,4337750	-3,9747000
51,4691250	2,8473000	0,2255250	0,7158000	38,8322250	-3,8839500
50,0626500	2,9796000	0,1332750	0,5488500	40,2322500	-3,7877250
48,6563250	3,1080000	0,0670500	0,3866250	41,6337750	-3,6861750
47,2503000	3,2323500	0,0241500	0,2294250	43,0365750	-3,5796000
45,8449500	3,3525750	0,0027000	0,0760500	44,4403500	-3,4683750
44,4403500	3,4683750	0,0027000	-0,0760500	45,8449500	-3,3525750
43,0365750	3,5796000	0,0241500	-0,2294250	47,2503000	-3,2323500
41,6337750	3,6861750	0,0670500	-0,3866250	48,6563250	-3,1080000
40,2322500	3,7877250	0,1332750	-0,5488500	50,0626500	-2,9796000
38,8322250	3,8839500	0,2255250	-0,7158000	51,4691250	-2,8473000
37,4337750	3,9747000	0,3465750	-0,8847750	52,8759000	-2,7111750
36,0366000	4,0595250	0,4989750	-1,0543500	54,2835000	-2,5713000
34,6406250	4,1383500	0,6837750	-1,2237000	55,6920000	-2,4277500

33,2465250	4,2108000	0,9009000	-1,3934250	57,1002000	-2,2809750
31,8555000	4,2764250	1,1528250	-1,5653250	58,5066000	-2,1310500
30,4680750	4,3347000	1,4482500	-1,7412750	59,9114250	-1,9774500
29,0841750	4,3849500	1,7986500	-1,9239750	61,3168500	-1,8199500
27,7029000	4,4267250	2,2175250	-2,1163500	62,7233250	-1,6589250
26,3241750	4,4596500	2,7190500	-2,3184750	64,1280750	-1,4948250
24,9486000	4,4834250	3,3158250	-2,5287750	65,5292250	-1,3275000
23,5774500	4,4973750	4,0195500	-2,7459000	66,9279000	-1,1565000
22,2119250	4,5006750	4,8405750	-2,9661000	68,3217000	-0,9825750
20,8524750	4,4927250	5,7779250	-3,1836750	69,6992250	-0,8073750
19,4997750	4,4725500	6,8177250	-3,3915000	71,0423250	-0,6325500
18,1545000	4,4393250	7,9370250	-3,5838000	72,3183000	-0,4626750
16,8177000	4,3921500	9,1161000	-3,7573500	73,4730750	-0,3059250
15,4908000	4,3299750	10,3389000	-3,9103500	74,4528000	-0,1705500
14,1758250	4,2519000	11,5947000	-4,0431750	75,0000000	-0,0945000
12,8757000	4,1565750	12,8757000	-4,1565750		

Tabla I.2 Coordenadas del NACA 0012 fabricado en milímetros

Anexo II. Características de las impresoras 3D empleadas

MECHANICAL PROPERTIES¹

	Test Method	Imperial	Metric
Tensile Strength, Type 1, 2 in/min (51 mm/min) 0.125	ASTM D638	5,300 psi	37 MPa
Tensile Modulus, Type 1, 2 in/min (51 mm/min) 0.125	ASTM D638	330,000 psi	2,320 MPa
Tensile Elongation, Type 1, 2 in/min (51 mm/min) 0.125	ASTM D638	3%	3%
Flexural Delamination	ASTM D790	4,500 psi	31 MPa
Flexural Strength	ASTM D790	7,600 psi	53 MPa
Flexural Modulus	ASTM D790	320,000 psi	2250 MPa
IZOD Impact, notched, (Method A, 73° (23° C))	ASTM D256	2.0 ft-lb/in	106 J/m

THERMAL PROPERTIES²

	Test Method	Imperial	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi (0.5 MPa)	ASTM D648	204° F	96° C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi (1.8 MPa)	ASTM D648	180° F	82° C
Glass Transition (TG)	DMA (SSYS)	226° F	108° C
Melt Point		(NA) ³	(NA) ³

OTHER³

	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.04
Vertical Burning Test	UL94	HB
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	4.90E-05 in/in/F
Dielectric Strength (kV / mm)	IEC 60112	28.0

¹ Build orientation is on side edge except for flexural delamination which is upright.

² Not applicable (NA) due to amorphous nature. Material does not display a melting point.

³ Literature value unless otherwise noted.

APPEARANCE

Standard colors include natural, black, dark gray red, blue, nectarine (orange), florescent yellow and olive green.

SYSTEM AVAILABILITY

Dimension Elite
Dimension BST 1200es
Dimension SST 1200es

Figura II.1 Características del material empleado por la Dimension bst 1200es

Mechanical Properties					
Test Method	Standard	English		Metric	
		XZ Orientation	ZX Orientation	XZ Orientation	ZX Orientation
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,200 psi	3,850 psi	29 MPa	27 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,750 psi	4,300 psi	33 MPa	30 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	290,000 psi	280,000 psi	2,010 MPa	1,950 MPa
Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	9%	3%	9%	3%
Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	2%	2%	2%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,700 psi	6,900 psi	60 MPa	48 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	270,000 psi	240,000 psi	1,870 MPa	1,630 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	No Break	4%	No Break	4%

Thermal Properties ²	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	208°F	98°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	196°F	91°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	217°F	103°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.90E-06 in/in/°F	8.79E-06 mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.60E-06 in/in/°F	8.28E-06 mm/mm/°C

Electrical Properties	Test Method	Orientation	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	XZ	1.0E14 - 1.0E15 ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	XZ	2.97 - 3.04
Dissipation Factor	ASTM D150-98	XZ	0.009
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	XZ	329 V/mil
Dielectric Strength	ASTM D149-09 Method A	ZX	414 V/mil

Mechanical Properties			
Test Method	Standard	English	Metric
Notched Impact, XZ orientation (Method A, 23°C)	ASTM D256	1.2 ft-lb/in	64 J/m
Unnotched Impact, XZ orientation (Method A, 23°C)	ASTM D256	6 ft-lb/in	321 J/m

Other	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.05
Flame Classification	UL94	HB
Rockwell Hardness	ASTM D785	82
UL File Number	-----	345258

System Availability	Layer Thickness Capability	Support Structure	Available Colors
Fortus 360mc	0.013 inch (0.330 mm)	Soluble Support	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%;">■ Black²</div> <div style="width: 50%;">■ Dark Blue</div> <div style="width: 50%;">■ Dark Gray</div> <div style="width: 50%;">■ Green</div> <div style="width: 50%;">■ Light Gray</div> <div style="width: 50%;">■ Yellow</div> <div style="width: 50%;">□ White</div> <div style="width: 50%;">■ Orange</div> <div style="width: 50%;">■ Ivory</div> <div style="width: 50%;">■ Red</div> </div>
Fortus 380mc	0.010 inch (0.254 mm)		
Fortus 400mc	0.007 inch (0.178 mm)		
Fortus 450mc	0.005 inch (0.127 mm)		
Fortus 900mc			

Figura II.2 Características del material empleado por la Fortus 400mc

Stratasys PolyJet™ Materials Data Sheet

Materials Simulating Engineering Plastics

Digital ABS, Green (RGD5160-DM, RGD5161-DM) made of RGD515 & RGD535 Digital ABS, Ivory (RGD5130-DM, RGD5131-DM) made of RGD515 & RGD531					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	55-60	psi	8000-8700
Elongation at break	D-638-05	%	25-40	%	25-40
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2600-3000	psi	375,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	65-75	psi	9,500-11,000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	1700-2200	psi	245,000-320,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	58-68	°F	136-154
HDT, °C @ 0.45MPa after thermal post treatment procedure A	D-648-06	°C	82-90	°F	180-194
HDT, °C @ 0.45MPa after thermal post treatment procedure B	D-648-06	°C	92-95	°F	198-203
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	51-55	°F	124-131
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	65-80	ft lb/inch	1.22-1.50
Tg	DMA, E _a	°C	47.53	°F	117-127
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	85-87	Scale D	85-87
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	67-69	Scale M	67-69
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.17-1.18		

High Temperature Material (RGD525)					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	70-80	psi	10,000-11,500
Elongation at break	D-638-05	%	10-15	%	10-15
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	3200-3500	psi	465,000-510,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	110-130	psi	16,000-19,000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	3100-3500	psi	450,000-510,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	63-67	°F	145-163
HDT, °C @ 0.45MPa after thermal post treatment procedure A	D-648-06	°C	75-80	°F	167-176
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	55-57	°F	131-135
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	14-16	ft lb/inch	0.262-0.300
Water Absorption, %	D-570-98 24hr	%	1.2-1.4	%	1.2-1.4
Tg	DMA, E _a	°C	62.65	°F	144-149
Shore Hardness D	Scale D	Scale D	87-88	Scale D	87-88
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	78-83	Scale M	78-83
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.17-1.19		
Ash content	USP281	%	0.38-0.42	%	0.38-0.42

Materials Simulating Standard Plastics

Transparent Materials					
RGD720					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	50-65	psi	7250-9450
Elongation at break	D-638-05	%	15-25	%	15-25
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	60-110	psi	12000-16000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2700-3300	psi	380,000-480,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30	ft lb/inch	0.375-0.562
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.5-2.2	%	1.5-2.2
Tg	DMA, E _a	°C	48-50	°F	118-122
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.18-1.19		
Ash content	USP281	%	0.01-0.02	%	0.01-0.02

Transparent Materials					
VeroClear RGD810					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	50-65	psi	7250-9450
Elongation at break	D-638-05	%	10-25	%	10-25
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	75-110	psi	11000-16000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2200-3200	psi	320,000-465,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30	ft lb/inch	0.375-0.562
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.1-1.5	%	1.1-1.5
Tg	DMA, E _a	°C	52-54	°F	126-129
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.18-1.19		
Ash content	USP281	%	0.02-0.06	%	0.02-0.06

Find material properties for color materials on the Color Digital Materials Data Sheet.

Rigid Opaque Materials					
VeroGray RGD850, VeroBlackPlus RGD875, VeroWhitePlus RGD835, VeroYellow RGD836, VeroCyan RGD841, VeroMagenta RGD851					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	50-85	psi	7250-8450
Elongation at break	D-638-05	%	10-25	%	10-25
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	75-110	psi	11000-16000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2200-3200	psi	320,000-465,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30	ft lb/inch	0.375-0.562
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.1-1.5	%	1.1-1.5
Tg	DMA, E _a	°C	52-54	°F	126-129
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.17-1.18	Scale M	73-76
Ash content VeroGray, VeroWhitePlus	USP281	%	0.23-0.26	%	0.23-0.26
Ash content VeroBlackPlus	USP281	%	0.01-0.02	%	0.01-0.02
Polypropylene-like Materials					
DurusWhite RGD430					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	20-30	psi	2900-4350
Elongation at break	D-638-05	%	40-50	%	40-50
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	1000-1200	psi	145,000-175,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	30-40	psi	4350-5800
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	1200-1600	psi	175,000-230,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	37-42	°F	99-108
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	32-34	°F	90-93
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	40-50	ft lb/inch	0.749-0.937
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.5-1.9	%	1.5-1.9
Tg	DMA, E _a	°C	35-37	°F	95-99
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	74-78	Scale D	74-78
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	no data	Scale M	no data
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.15-1.17	Scale M	74-78
Ash content	USP281	%	0.10-0.12	%	0.1-0.12
Ender RGD450					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	40-45	psi	5800-6500
Elongation at break	D-638-05	%	20-35	%	20-35
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	1700-2100	psi	246,000 - 305,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	52-59	psi	7500 - 8500
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	1500-1700	psi	217,000 - 246,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	49-54	°F	120-129
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	30-35	ft lb/inch	0.561-0.656
Tg	DMA, E _a	°C	48-52	°F	118-126
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	80-84	Scale D	80-84
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	58-62	Scale M	58-62
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.20-1.21	Scale M	58-62
Ash content	USP281	%	0.3-0.4	%	0.3-0.4
VeroBlue RGD840					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	50-60	psi	7250-8700
Elongation at break	D-638-05	%	15-25	%	15-25
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	60-70	psi	8700-10200
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	1900-2500	psi	285,000-365,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30	ft lb/inch	0.375-0.562
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.5-2.2	%	1.5-2.2
Tg	DMA, E _a	°C	48-50	°F	118-122
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.18-1.19	Scale M	73-76
Ash content	USP281	%	0.21-0.22	%	0.21-0.22
Rubber-like Materials					
TangoBlackPlus FLX980 and TangoPlus FLX930					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-412	MPa	0.8-1.5	psi	115-220
Elongation at break	D-412	%	170-220	%	170-220
Compressive set	D-395	%	4-5	%	4-5
Shore Hardness (A)	D-2240	Scale A	26-28	Scale A	26-28
Tensile Tear resistance	D-624	Kg/cm	2-4	Lb/in	18-22
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.12-1.13	Scale M	18-22
TangoBlack FLX973					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-412	MPa	1.8-2.4	psi	115-350
Elongation at break	D-412	%	45-55	%	45-55
Compressive set	D-395	%	0.5-1.5	%	0.5-1.5
Shore Hardness (A)	D-2240	Scale A	60-62	Scale A	60-62
Tensile Tear resistance	D-624	Kg/cm	3-5	Lb/in	18-24
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.14-1.15	Scale M	18-24
TangoGray FLX950					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-412	MPa	3-5	psi	435-725
Elongation at break	D-412	%	45-55	%	45-55
Compressive set	D-395	%	0.5-1.5	%	0.5-1.5
Shore Hardness (A)	D-2240	Scale A	73-77	Scale A	73-77
Tensile Tear resistance	D-624	Kg/cm	8-12	Lb/in	50-60
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.16-1.17	Scale M	50-60



The data included in this brochure is for your information purposes only and should not be considered specific advice to any particular customer project. Each customer is responsible for the design, functioning and all other decisions with regards to fit, particular projects and systems. The sale and provision of the products described in this brochure are subject to terms and conditions outlined in Stratays' selling policies, contracts between the parties or Stratays' Terms and Conditions of Sale. This brochure is not intended to be used in any way that is not intended or to add to any such contract or terms. © 2014 Stratays Ltd. All rights reserved. Stratays, Stratays logo, Objet, For a 3D World, Objet2, Objet30, Objet 30 Pro, Objet30 Ormohex, Objet Studio, Quadra, QuadraTempo, FullCure, 5inE, Eden, Eden250, Eden260, Eden260V, Eden 330, Eden330, Eden330V, Eden500V, Job Manager, CAD/Matry, Connex, Connex3, Connex350, Connex360, Connex370, Connex380, Connex390, Connex400, Connex410, Connex420, Connex430, Connex440, Connex450, Connex460, Connex470, Connex480, Connex490, Connex500, Connex510, Connex520, Connex530, Connex540, Connex550, Connex560, Connex570, Connex580, Connex590, Connex600, Connex610, Connex620, Connex630, Connex640, Connex650, Connex660, Connex670, Connex680, Connex690, Connex700, Connex710, Connex720, Connex730, Connex740, Connex750, Connex760, Connex770, Connex780, Connex790, Connex800, Connex810, Connex820, Connex830, Connex840, Connex850, Connex860, Connex870, Connex880, Connex890, Connex900, Connex910, Connex920, Connex930, Connex940, Connex950, Connex960, Connex970, Connex980, Connex990, Connex1000, Connex1010, Connex1020, Connex1030, Connex1040, Connex1050, Connex1060, Connex1070, Connex1080, Connex1090, Connex1100, Connex1110, Connex1120, Connex1130, Connex1140, Connex1150, Connex1160, Connex1170, Connex1180, Connex1190, Connex1200, Connex1210, Connex1220, Connex1230, Connex1240, Connex1250, Connex1260, Connex1270, Connex1280, Connex1290, Connex1300, Connex1310, Connex1320, Connex1330, Connex1340, Connex1350, Connex1360, Connex1370, Connex1380, Connex1390, Connex1400, Connex1410, Connex1420, Connex1430, Connex1440, Connex1450, Connex1460, Connex1470, Connex1480, Connex1490, Connex1500, Connex1510, Connex1520, Connex1530, Connex1540, Connex1550, Connex1560, Connex1570, Connex1580, Connex1590, Connex1600, Connex1610, Connex1620, Connex1630, Connex1640, Connex1650, Connex1660, Connex1670, Connex1680, Connex1690, Connex1700, Connex1710, Connex1720, Connex1730, Connex1740, Connex1750, Connex1760, Connex1770, Connex1780, Connex1790, Connex1800, Connex1810, Connex1820, Connex1830, Connex1840, Connex1850, Connex1860, Connex1870, Connex1880, Connex1890, Connex1900, Connex1910, Connex1920, Connex1930, Connex1940, Connex1950, Connex1960, Connex1970, Connex1980, Connex1990, Connex2000, Connex2010, Connex2020, Connex2030, Connex2040, Connex2050, Connex2060, Connex2070, Connex2080, Connex2090, Connex2100, Connex2110, Connex2120, Connex2130, Connex2140, Connex2150, Connex2160, Connex2170, Connex2180, Connex2190, Connex2200, Connex2210, Connex2220, Connex2230, Connex2240, Connex2250, Connex2260, Connex2270, Connex2280, Connex2290, Connex2300, Connex2310, Connex2320, Connex2330, Connex2340, Connex2350, Connex2360, Connex2370, Connex2380, Connex2390, Connex2400, Connex2410, Connex2420, Connex2430, Connex2440, Connex2450, Connex2460, Connex2470, Connex2480, Connex2490, Connex2500, Connex2510, Connex2520, Connex2530, Connex2540, Connex2550, Connex2560, Connex2570, Connex2580, Connex2590, Connex2600, Connex2610, Connex2620, Connex2630, Connex2640, Connex2650, Connex2660, Connex2670, Connex2680, Connex2690, Connex2700, Connex2710, Connex2720, Connex2730, Connex2740, Connex2750, Connex2760, Connex2770, Connex2780, Connex2790, Connex2800, Connex2810, Connex2820, Connex2830, Connex2840, Connex2850, Connex2860, Connex2870, Connex2880, Connex2890, Connex2900, Connex2910, Connex2920, Connex2930, Connex2940, Connex2950, Connex2960, Connex2970, Connex2980, Connex2990, Connex3000, Connex3010, Connex3020, Connex3030, Connex3040, Connex3050, Connex3060, Connex3070, Connex3080, Connex3090, Connex3100, Connex3110, Connex3120, Connex3130, Connex3140, Connex3150, Connex3160, Connex3170, Connex3180, Connex3190, Connex3200, Connex3210, Connex3220, Connex3230, Connex3240, Connex3250, Connex3260, Connex3270, Connex3280, Connex3290, Connex3300, Connex3310, Connex3320, Connex3330, Connex3340, Connex3350, Connex3360, Connex3370, Connex3380, Connex3390, Connex3400, Connex3410, Connex3420, Connex3430, Connex3440, Connex3450, Connex3460, Connex3470, Connex3480, Connex3490, Connex3500, Connex3510, Connex3520, Connex3530, Connex3540, Connex3550, Connex3560, Connex3570, Connex3580, Connex3590, Connex3600, Connex3610, Connex3620, Connex3630, Connex3640, Connex3650, Connex3660, Connex3670, Connex3680, Connex3690, Connex3700, Connex3710, Connex3720, Connex3730, Connex3740, Connex3750, Connex3760, Connex3770, Connex3780, Connex3790, Connex3800, Connex3810, Connex3820, Connex3830, Connex3840, Connex3850, Connex3860, Connex3870, Connex3880, Connex3890, Connex3900, Connex3910, Connex3920, Connex3930, Connex3940, Connex3950, Connex3960, Connex3970, Connex3980, Connex3990, Connex4000, Connex4010, Connex4020, Connex4030, Connex4040, Connex4050, Connex4060, Connex4070, Connex4080, Connex4090, Connex4100, Connex4110, Connex4120, Connex4130, Connex4140, Connex4150, Connex4160, Connex4170, Connex4180, Connex4190, Connex4200, Connex4210, Connex4220, Connex4230, Connex4240, Connex4250, Connex4260, Connex4270, Connex4280, Connex4290, Connex4300, Connex4310, Connex4320, Connex4330, Connex4340, Connex4350, Connex4360, Connex4370, Connex4380, Connex4390, Connex4400, Connex4410, Connex4420, Connex4430, Connex4440, Connex4450, Connex4460, Connex4470, Connex4480, Connex4490, Connex4500, Connex4510, Connex4520, Connex4530, Connex4540, Connex4550, Connex4560, Connex4570, Connex4580, Connex4590, Connex4600, Connex4610, Connex4620, Connex4630, Connex4640, Connex4650, Connex4660, Connex4670, Connex4680, Connex4690, Connex4700, Connex4710, Connex4720, Connex4730, Connex4740, Connex4750, Connex4760, Connex4770, Connex4780, Connex4790, Connex4800, Connex4810, Connex4820, Connex4830, Connex4840, Connex4850, Connex4860, Connex4870, Connex4880, Connex4890, Connex4900, Connex4910, Connex4920, Connex4930, Connex4940, Connex4950, Connex4960, Connex4970, Connex4980, Connex4990, Connex5000, Connex5010, Connex5020, Connex5030, Connex5040, Connex5050, Connex5060, Connex5070, Connex5080, Connex5090, Connex5100, Connex5110, Connex5120, Connex5130, Connex5140, Connex5150, Connex5160, Connex5170, Connex5180, Connex5190, Connex5200, Connex5210, Connex5220, Connex5230, Connex5240, Connex5250, Connex5260, Connex5270, Connex5280, Connex5290, Connex5300, Connex5310, Connex5320, Connex5330, Connex5340, Connex5350, Connex5360, Connex5370, Connex5380, Connex5390, Connex5400, Connex5410, Connex5420, Connex5430, Connex5440, Connex5450, Connex5460, Connex5470, Connex5480, Connex5490, Connex5500, Connex5510, Connex5520, Connex5530, Connex5540, Connex5550, Connex5560, Connex5570, Connex5580, Connex5590, Connex5600, Connex5610, Connex5620, Connex5630, Connex5640, Connex5650, Connex5660, Connex5670, Connex5680, Connex5690, Connex5700, Connex5710, Connex5720, Connex5730, Connex5740, Connex5750, Connex5760, Connex5770, Connex5780, Connex5790, Connex5800, Connex5810, Connex5820, Connex5830, Connex5840, Connex5850, Connex5860, Connex5870, Connex5880, Connex5890, Connex5900, Connex5910, Connex5920, Connex5930, Connex5940, Connex5950, Connex5960, Connex5970, Connex5980, Connex5990, Connex6000, Connex6010, Connex6020, Connex6030, Connex6040, Connex6050, Connex6060, Connex6070, Connex6080, Connex6090, Connex6100, Connex6110, Connex6120, Connex6130, Connex6140, Connex6150, Connex6160, Connex6170, Connex6180, Connex6190, Connex6200, Connex6210, Connex6220, Connex6230, Connex6240, Connex6250, Connex6260, Connex6270, Connex6280, Connex6290, Connex6300, Connex6310, Connex6320, Connex6330, Connex6340, Connex6350, Connex6360, Connex6370, Connex6380, Connex6390, Connex6400, Connex6410, Connex6420, Connex6430, Connex6440, Connex6450, Connex6460, Connex6470, Connex6480, Connex6490, Connex6500, Connex6510, Connex6520, Connex6530, Connex6540, Connex6550, Connex6560, Connex6570, Connex6580, Connex6590, Connex6600, Connex6610, Connex6620, Connex6630, Connex6640, Connex6650, Connex6660, Connex6670, Connex6680, Connex6690, Connex6700, Connex6710, Connex6720, Connex6730, Connex6740, Connex6750, Connex6760, Connex6770, Connex6780, Connex6790, Connex6800, Connex6810, Connex6820, Connex6830, Connex6840, Connex6850, Connex6860, Connex6870, Connex6880, Connex6890, Connex6900, Connex6910, Connex6920, Connex6930, Connex6940, Connex6950, Connex6960, Connex6970, Connex6980, Connex6990, Connex7000, Connex7010, Connex7020, Connex7030, Connex7040, Connex7050, Connex7060, Connex7070, Connex7080, Connex7090, Connex7100, Connex7110, Connex7120, Connex7130, Connex7140, Connex7150, Connex7160, Connex7170, Connex7180, Connex7190, Connex7200, Connex7210, Connex7220, Connex7230, Connex7240, Connex7250, Connex7260, Connex7270, Connex7280, Connex7290, Connex7300, Connex7310, Connex7320, Connex7330, Connex7340, Connex7350, Connex7360, Connex7370, Connex7380, Connex7390, Connex7400, Connex7410, Connex7420, Connex7430, Connex7440, Connex7450, Connex7460, Connex7470, Connex7480, Connex7490, Connex7500, Connex7510, Connex7520, Connex7530, Connex7540, Connex7550, Connex7560, Connex7570, Connex7580, Connex7590, Connex7600, Connex7610, Connex7620, Connex7630, Connex7640, Connex7650, Connex7660, Connex7670, Connex7680, Connex7690, Connex7700, Connex7710, Connex7720, Connex7730, Connex7740, Connex7750, Connex7760, Connex7770, Connex7780, Connex7790, Connex7800, Connex7810, Connex7820, Connex7830, Connex7840, Connex7850, Connex7860, Connex7870, Connex7880, Connex7890, Connex7900, Connex7910, Connex7920, Connex7930, Connex7940, Connex7950, Connex7960, Connex7970, Connex7980, Connex7990, Connex8000, Connex8010, Connex8020, Connex8030, Connex8040, Connex8050, Connex8060, Connex8070, Connex8080, Connex8090, Connex8100, Connex8110, Connex8120, Connex8130, Connex8140, Connex8150, Connex8160, Connex8170, Connex8180, Connex8190, Connex8200, Connex8210, Connex8220, Connex8230, Connex8240, Connex8250, Connex8260, Connex8270, Connex8280, Connex8290, Connex8300, Connex8310, Connex8320, Connex8330, Connex8340, Connex8350, Connex8360, Connex8370, Connex8380, Connex8390, Connex8400, Connex8410, Connex8420, Connex8430, Connex8440, Connex8450, Connex8460, Connex8470, Connex8480, Connex8490, Connex8500, Connex8510, Connex8520, Connex8530, Connex8540, Connex8550, Connex8560, Connex8570, Connex8580, Connex8590, Connex8600, Connex8610, Connex8620, Connex8630, Connex8640, Connex8650, Connex8660, Connex8670, Connex8680, Connex8690, Connex8700, Connex8710, Connex8720, Connex8730, Connex8740, Connex8750, Connex8760, Connex8770, Connex8780, Connex8790, Connex8800, Connex8810, Connex8820, Connex8830, Connex8840, Connex8850, Connex8860, Connex8870, Connex8880, Connex8890, Connex8900, Connex8910, Connex8920, Connex8930, Connex8940, Connex8950, Connex8960, Connex8970, Connex8980, Connex8990, Connex9000, Connex9010, Connex9020, Connex9030, Connex9040, Connex9050, Connex9060, Connex9070, Connex9080, Connex9090, Connex9100, Connex9110, Connex9120, Connex9130, Connex9140, Connex9150, Connex9160, Connex9170, Conn

Anexo III. Datos de los ensayos de medida de fuerzas aerodinámicas

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P_a (Pa)	T_a (°C)	T_a (K)	R_g (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
100540	26,9	299,9	287	1,16810133

Ángulo de ataque	$L_{balanza}$	L_{real}	C_L
-7	-1,95	-2,16378162	-0,88635312
-6	-1,70	-1,88637372	-0,7727181
-5	-1,42	-1,57567688	-0,64544688
-4	-1,06	-1,1762095	-0,48181246
-3	-0,91	-1,00976476	-0,41363145
-2	-0,65	-0,72126054	-0,29545104
-1	-0,33	-0,36617843	-0,14999822
0	0,00	0	0
1	0,76	0,84332002	0,34545045
2	1,01	1,12072792	0,45908546
3	1,25	1,3870395	0,56817507
4	1,85	2,05281846	0,84089911
5	2,05	2,27474478	0,93180712
6	2,30	2,55215269	1,04544214
7	2,50	2,77407901	1,13635015
8	2,81	3,1180648	1,27725757
9	3,00	3,32889481	1,36362018
10	3,11	3,45095428	1,41361959
11	3,31	3,6728806	1,5045276
12	3,40	3,77274745	1,5454362
13	2,95	3,27341323	1,34089318
14	2,80	3,10696849	1,27271217
15	2,70	2,99600533	1,22725816
16	2,67	2,96271638	1,21362196
17	2,69	2,98490901	1,22271276

Ángulo de ataque	$D_{balanza}$	D_{real}	C_D
-7	0,22	0,23737592	0,09723665
-6	0,20	0,21579629	0,08839696
-5	0,15	0,16184722	0,06629772
-4	0,13	0,14026759	0,05745802
-3	0,12	0,12947777	0,05303817
-2	0,11	0,11868796	0,04861833
-1	0,10	0,10789814	0,04419848
0	0,10	0,10789814	0,04419848

1	0,08	0,08631852	0,03535878
2	0,07	0,0755287	0,03093894
3	0,07	0,0755287	0,03093894
4	0,06	0,06473889	0,02651909
5	0,07	0,0755287	0,03093894
6	0,08	0,08631852	0,03535878
7	0,09	0,09710833	0,03977863
8	0,11	0,11868796	0,04861833
9	0,12	0,12947777	0,05303817
10	0,14	0,1510574	0,06187787
11	0,16	0,17263703	0,07071757
12	0,30	0,32369443	0,13259544
13	0,50	0,53949072	0,22099239
14	0,57	0,61501942	0,25193133
15	0,65	0,70133794	0,28729011
16	0,72	0,77686664	0,31822905
17	0,81	0,87397497	0,35800768

Tabla III.1 Ensayo con el perfil 1 y $Re = 5.50 \cdot 10^4$

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P_a (Pa)	T_a (°C)	T_a (K)	R_g (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
100630	26,6	299,6	287	1,17031768

Ángulo de ataque	$L_{balanza}$	L_{real}	C_L
-7	-5,12	-5,6813138	-0,80558485
-6	-4,66	-5,17088327	-0,73320808
-5	-3,85	-4,27208167	-0,60576204
-4	-3,15	-3,49533955	-0,49562349
-3	-2,63	-2,91833111	-0,41380628
-2	-1,62	-1,7976032	-0,25489208
-1	-0,80	-0,88770528	-0,12587263
0	0,00	0	0
1	0,77	0,85441633	0,12115241
2	1,92	2,13049268	0,30209432
3	3,13	3,47314692	0,49247667
4	3,60	3,99467377	0,56642684
5	4,16	4,61606747	0,65453769
6	4,78	5,30403906	0,75208898
7	5,27	5,84775854	0,82918596
8	5,07	5,62583222	0,79771781
9	6,56	7,27918331	1,03215558

10	7,03	7,80071016	1,10610576
11	7,56	8,38881491	1,18949637
12	7,93	8,79937861	1,24771247
13	8,27	9,17665335	1,30120834
14	7,50	8,32223702	1,18005593
15	7,55	8,3777186	1,18792297
16	7,22	8,01154017	1,13600051
17	7,15	7,93386596	1,12498665

Ángulo de ataque	$D_{balanza}$	D_{real}	C_D
-7	0,51	0,55028054	0,07802731
-6	0,44	0,47475183	0,06731768
-5	0,39	0,42080276	0,05966795
-4	0,34	0,36685369	0,05201821
-3	0,21	0,2265861	0,03212889
-2	0,27	0,29132499	0,04130858
-1	0,23	0,24816573	0,03518879
0	0,20	0,21579629	0,03059895
1	0,18	0,19421666	0,02753905
2	0,17	0,18342685	0,0260091
3	0,14	0,1510574	0,02141926
4	0,15	0,16184722	0,02294921
5	0,13	0,14026759	0,01988932
6	0,14	0,1510574	0,02141926
7	0,15	0,16184722	0,02294921
8	0,18	0,19421666	0,02753905
9	0,21	0,2265861	0,03212889
10	0,25	0,26974536	0,03824868
11	0,30	0,32369443	0,04589842
12	0,36	0,38843332	0,0550781
13	0,43	0,46396202	0,06578774
14	0,94	1,01424256	0,14381505
15	1,08	1,16529996	0,16523431
16	1,38	1,48899439	0,21113273
17	1,62	1,74794994	0,24785147

Tabla III.2 Ensayo con el perfil 1 y $Re = 9.35 \cdot 10^4$

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P_a (Pa)	T_a (°C)	T_a (K)	R_g (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
100650	27	300	287	1,16898955

Ángulo de ataque	$L_{balanza}$	L_{real}	C_L
-7	-9,66	-10,7190413	-0,75995601
-6	-8,56	-9,49844652	-0,67341858
-5	-7,52	-8,34442965	-0,59160137
-4	-6,24	-6,9241012	-0,49090326
-3	-4,91	-5,44829117	-0,38627164
-2	-4,13	-4,58277852	-0,32490873
-1	-2,41	-2,67421216	-0,18959565
0	0,00	0	0
1	1,12	1,24278739	0,08811084
2	2,51	2,78517532	0,19746269
3	4,30	4,77141589	0,3382827
4	6,01	6,66888593	0,47280907
5	7,06	7,83399911	0,55541299
6	8,05	8,9325344	0,63329668
7	9,25	10,2640923	0,72770115
8	10,19	11,307146	0,80165132
9	11,45	12,7052818	0,90077602
10	12,40	13,7594319	0,97551289
11	13,81	15,3240124	1,08643815
12	14,44	16,0230803	1,1360005
13	15,07	16,7221482	1,18556285
14	15,49	17,1881935	1,21860441
15	13,87	15,3905903	1,09115838
16	14,02	15,5570351	1,10295893
17	14,17	15,7234798	1,11475949

Ángulo de ataque	$D_{balanza}$	D_{real}	C_D
-7	0,90	0,9710833	0,06884763
-6	0,81	0,87397497	0,06196287
-5	0,72	0,77686664	0,0550781
-4	0,63	0,67975831	0,04819334
-3	0,56	0,60422961	0,04283853
-2	0,53	0,57186016	0,0405436
-1	0,45	0,48554165	0,03442382
0	0,34	0,36685369	0,0260091
1	0,30	0,32369443	0,02294921
2	0,25	0,26974536	0,01912434
3	0,23	0,24816573	0,01759439
4	0,20	0,21579629	0,01529947
5	0,20	0,21579629	0,01529947
6	0,23	0,24816573	0,01759439
7	0,29	0,31290462	0,02218424

8	0,32	0,34527406	0,02447916
9	0,38	0,41001295	0,029069
10	0,44	0,47475183	0,03365884
11	0,59	0,63659905	0,04513345
12	0,66	0,71212775	0,05048826
13	0,74	0,79844627	0,05660805
14	0,90	0,9710833	0,06884763
15	1,85	1,99611567	0,14152013
16	2,09	2,25507121	0,1598795
17	2,27	2,44928787	0,17364902

Tabla III.3 Ensayo con el perfil 1 y $Re = 1.32 \cdot 10^5$

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P_a (Pa)	T_a (°C)	T_a (K)	R_g (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
101190	26,7	299,7	287	1,17643776

Ángulo de ataque	$L_{balanza}$	L_{real}	C_L
-6	-1,73	-1,91966267	-0,786354299
-5	-1,47	-1,63115846	-0,668173884
-4	-1,24	-1,37594319	-0,563629671
-3	-0,93	-1,03195739	-0,422722253
-2	-0,70	-0,77674212	-0,31817804
-1	-0,40	-0,44385264	-0,181816023
0	0,00	0	0
1	0,28	0,31069685	0,127271216
2	0,68	0,75454949	0,309087239
3	1,12	1,24278739	0,509084864
4	1,36	1,50909898	0,618174478
5	1,59	1,76431425	0,722718691
6	1,86	2,06391478	0,845444506
7	2,12	2,352419	0,963624921
8	2,32	2,57434532	1,054532933
9	2,58	2,86284953	1,172713347
10	2,86	3,17354638	1,299984563
11	3,08	3,41766534	1,399983376
12	3,10	3,43985797	1,409074177
13	2,73	3,02929427	1,240894356
14	2,80	3,10696849	1,27271216
15	2,75	3,05148691	1,249985157
16	2,63	2,91833111	1,19544035
17	2,60	2,88504217	1,181804149

Ángulo de ataque	D_{balanza}	D_{real}	C_D
-6	0,21	0,2265861	0,09281681
-5	0,18	0,19421666	0,07955726
-4	0,16	0,17263703	0,07071757
-3	0,14	0,1510574	0,06187787
-2	0,13	0,14026759	0,05745802
-1	0,12	0,12947777	0,05303817
0	0,10	0,10789814	0,04419848
1	0,12	0,12947777	0,05303817
2	0,10	0,10789814	0,04419848
3	0,10	0,10789814	0,04419848
4	0,10	0,10789814	0,04419848
5	0,07	0,0755287	0,03093894
6	0,09	0,09710833	0,03977863
7	0,10	0,10789814	0,04419848
8	0,10	0,10789814	0,04419848
9	0,13	0,14026759	0,05745802
10	0,16	0,17263703	0,07071757
11	0,21	0,2265861	0,09281681
12	0,35	0,3776435	0,15469468
13	0,47	0,50712128	0,20773285
14	0,58	0,62580924	0,25635118
15	0,66	0,71212775	0,29170996
16	0,74	0,79844627	0,32706874
17	0,83	0,8955546	0,36684737

Tabla III.4 Ensayo con el perfil 2 y $Re = 5.50 \cdot 10^4$

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P_a (Pa)	T_a (°C)	T_a (K)	R_g (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
101120	26,7	299,7	287	1,17562394

Ángulo de ataque	L_{balanza}	L_{real}	C_L
-6	-3,80	-4,21660009	-0,597895001
-5	-3,23	-3,58411008	-0,508210751
-4	-2,70	-2,99600533	-0,424820132
-3	-2,27	-2,51886374	-0,357163593
-2	-1,20	-1,33155792	-0,188808948
-1	-0,70	-0,77674212	-0,110138553
0	0,00	0	0
1	0,76	0,84332002	0,119579
2	1,68	1,86418109	0,264332527

3	2,41	2,67421216	0,379191303
4	2,91	3,22902796	0,457861698
5	3,50	3,88371061	0,550692764
6	4,30	4,77141589	0,676565396
7	4,81	5,33732801	0,756809199
8	5,40	5,99201065	0,849640265
9	5,95	6,60230803	0,936177699
10	6,50	7,21260542	1,022715133
11	7,10	7,87838438	1,117119607
12	7,56	8,38881491	1,18949637
13	7,22	8,01154017	1,136000502
14	6,97	7,73413227	1,096665304
15	6,8	7,5454949	1,06991737
16	6,60	7,32356858	1,038449212
17	6,63	7,35685752	1,043169436

Ángulo de ataque	$D_{balanza}$	D_{real}	C_D
-6	0,44	0,47475183	0,06731768
-5	0,38	0,41001295	0,058138
-4	0,35	0,3776435	0,05354816
-3	0,31	0,33448425	0,04742837
-2	0,29	0,31290462	0,04436847
-1	0,27	0,29132499	0,04130858
0	0,23	0,24816573	0,03518879
1	0,22	0,23737592	0,03365884
2	0,15	0,16184722	0,02294921
3	0,14	0,1510574	0,02141926
4	0,15	0,16184722	0,02294921
5	0,17	0,18342685	0,0260091
6	0,20	0,21579629	0,03059895
7	0,21	0,2265861	0,03212889
8	0,23	0,24816573	0,03518879
9	0,28	0,3021148	0,04283853
10	0,32	0,34527406	0,04895831
11	0,38	0,41001295	0,058138
12	0,50	0,53949072	0,07649737
13	1,00	1,07898144	0,15299473
14	1,28	1,38109625	0,19583326
15	1,50	1,61847216	0,2294921
16	1,70	1,83426845	0,26009105
17	1,87	2,0176953	0,28610015

Tabla III.5 Ensayo con el perfil 2 y $Re = 9.35 \cdot 10^4$

CONDICIONES AMBIENTALES			DATOS AIRE	
P_a (Pa)	T_a (°C)	T_a (K)	R_g (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
101130	25,5	298,5	287	1,18046679

Ángulo de ataque	$L_{balanza}$	L_{real}	C_L
-5	-6,35	-7,04616067	-0,49955701
-4	-5,25	-5,82556591	-0,413019575
-3	-3,94	-4,37194851	-0,309961357
-2	-2,46	-2,72969374	-0,193529172
-1	-1,30	-1,44252108	-0,102271514
0	0,00	0	0
1	0,88	0,97647581	0,069229948
2	1,85	2,05281846	0,145540231
3	3,08	3,41766534	0,242304817
4	4,62	5,126498	0,363457226
5	5,45	6,04749223	0,428753654
6	6,83	7,57878384	0,5373188
7	8,06	8,94363071	0,634083386
8	9,09	10,0865513	0,715113893
9	10,23	11,3515313	0,804798143
10	11,54	12,8051487	0,907856361
11	12,70	14,0923213	0,99911402
12	13,82	15,3351087	1,087224862
13	13,40	14,8690635	1,054183296
14	13,05	14,4806924	1,026648658
15	12,01	13,3266755	0,944831447
16	11,80	13,0936529	0,928310664
17	12,17	13,5042166	0,95741871

Ángulo de ataque	$D_{balanza}$	D_{real}	C_D
-5	0,80	0,86318515	0,06119789
-4	0,67	0,72291757	0,05125324
-3	0,60	0,64738886	0,04589842
-2	0,51	0,55028054	0,03901366
-1	0,47	0,50712128	0,03595376
0	0,42	0,45317221	0,03212889
1	0,36	0,38843332	0,02753905
2	0,34	0,36685369	0,0260091
3	0,32	0,34527406	0,02447916
4	0,34	0,36685369	0,0260091
5	0,33	0,35606388	0,02524413
6	0,49	0,52870091	0,03748371
7	0,69	0,74449719	0,05278318

8	0,75	0,80923608	0,05737303
9	0,51	0,55028054	0,03901366
10	0,45	0,48554165	0,03442382
11	0,70	0,75528701	0,05354816
12	0,84	0,90634441	0,06425779
13	1,57	1,69400086	0,12010087
14	1,86	2,00690548	0,1422851
15	2,11	2,27665084	0,16140945
16	2,43	2,6219249	0,1858886
17	2,87	3,09667674	0,21954744

Tabla III.6 Ensayo con el perfil 2 y $Re = 1.32 \cdot 10^5$

Anexo IV. Datos de referencia de fuerzas aerodinámicas

Ángulo de ataque	C_L (Re=3·10 ⁶ /Re=6·10 ⁶ /Re=9·10 ⁶)	C_L (rugosidad estándar)
-10	-1.1	-
-8	-0.8	-0.8
-6	-0.6	-0.6
-4	-0.4	-0.4
-2	-0.2	-0.2
0	0	0
2	0.2	0.2
4	0.4	0.4
6	0.6	0.6
8	0.8	0.8
10	1.1	0.95
12	1.25	1.1
14	1.35	0.65
16	1.6	-
18	1.1	-
20	0.85	-

Tabla IV.1 Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque obtenido de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Ángulo de ataque	C_D (Re = 3·10 ⁶)	C_D (Re = 6·10 ⁶)	C_D (Re = 9·10 ⁶)	C_D (rugosidad estándar)
-10	0.0125	0.0100	0.0092	-
-8	0.0095	0.0082	0.0077	0.0180
-6	0.0080	0.0072	0.0070	0.0135
-4	0.0064	0.0063	0.0062	0.0116
-2	0.0060	0.0060	0.0060	0.0102
0	0.0058	0.0058	0.0058	0.0098
2	0.0061	0.0060	0.0059	0.0102
4	0.0070	0.0067	0.0067	0.0115
6	0.0080	0.0076	0.0074	0.0140
8	0.0095	0.0084	0.0081	0.0180
10	0.0130	0.0110	0.0100	-

Tabla IV.2 Coeficiente de arrastre frente al ángulo de ataque obtenido de ABBOTT & VON DOENHOFF (1959)

Ángulo de ataque	C_L (Ra = 150 μm)	C_L (Ra = 30 μm)	C_L (Ra = 0 μm)
0	0	0	0
2.5	0.25	0.35	0.37
5	0.51	0.64	0.68
7.5	0.75	0.85	0.9
10	0.97	1.05	1.11
12.5	1.15	1.2	1.28
15	1.25	1.30	1.38
17.5	1.27	1.37	1.40
20	1.15	1.25	1.36

*Tabla IV.3 Coeficiente de sustentación frente al ángulo de ataque obtenido de MAHEL
MOHAMMED (2008)*

Anexo V. Planos de los perfiles aerodinámicos

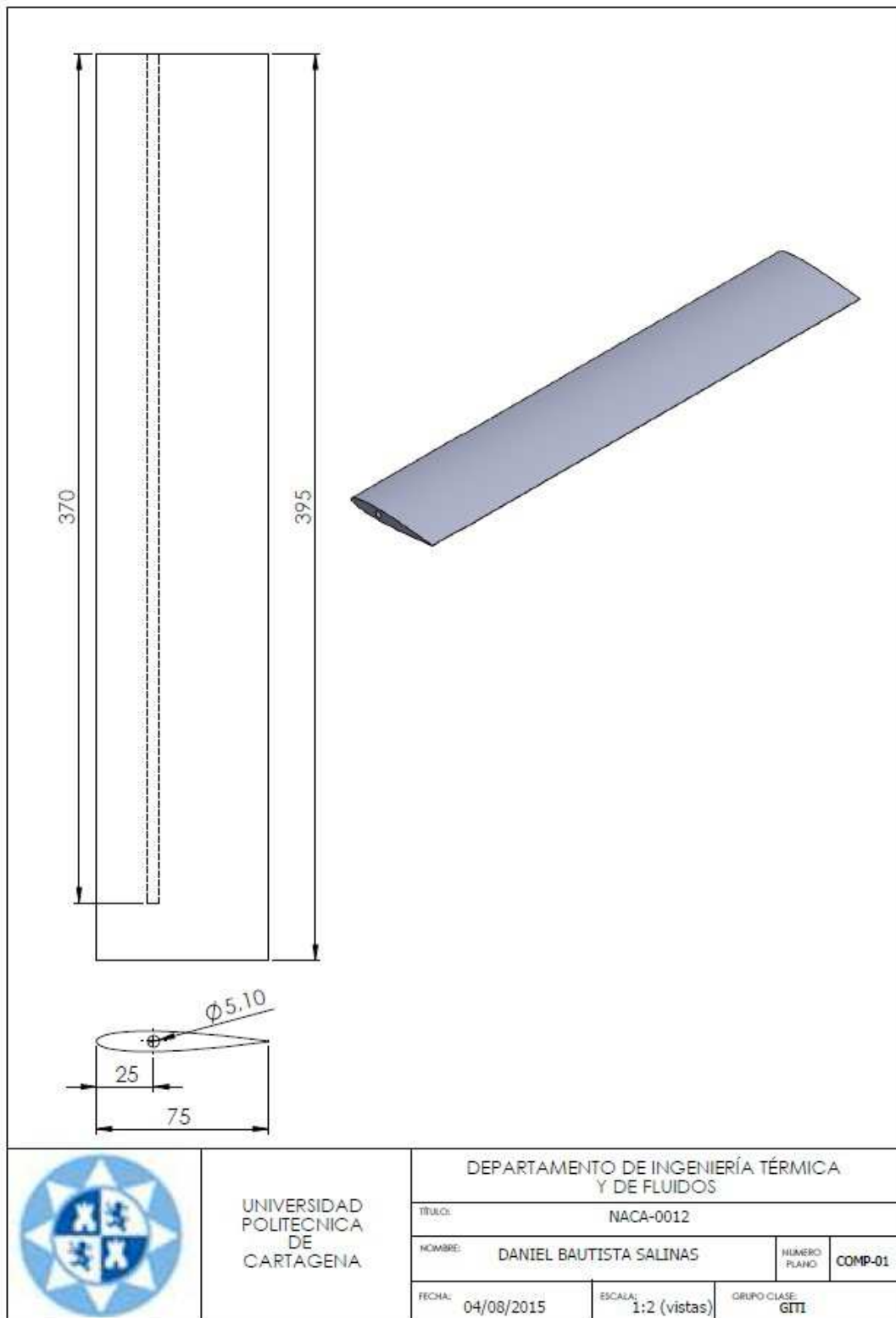


Figura V.1 Plano perfil NACA 0012

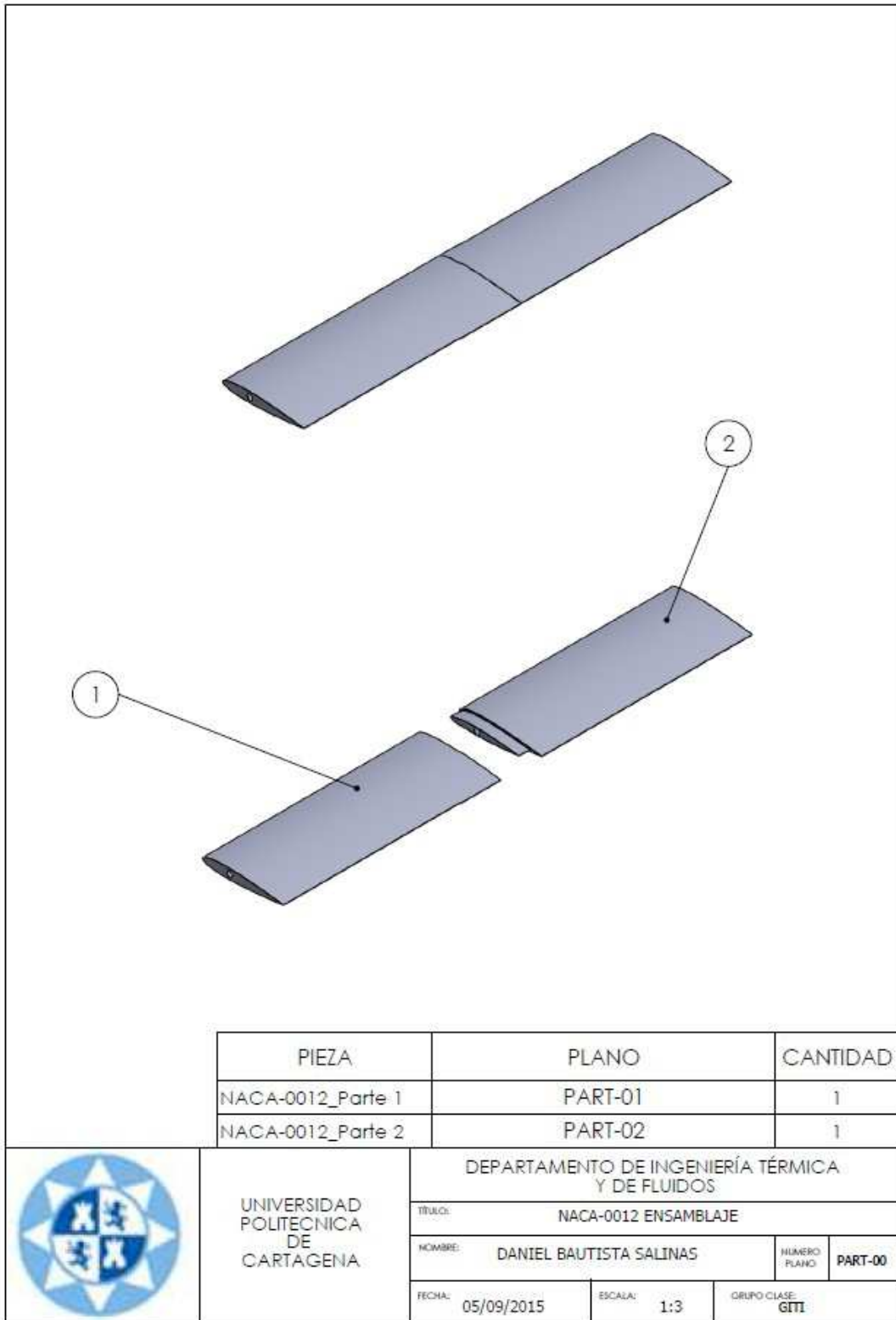


Figura V.2 Plano ensamble de las partes 1 y 2 del perfil NACA 0012

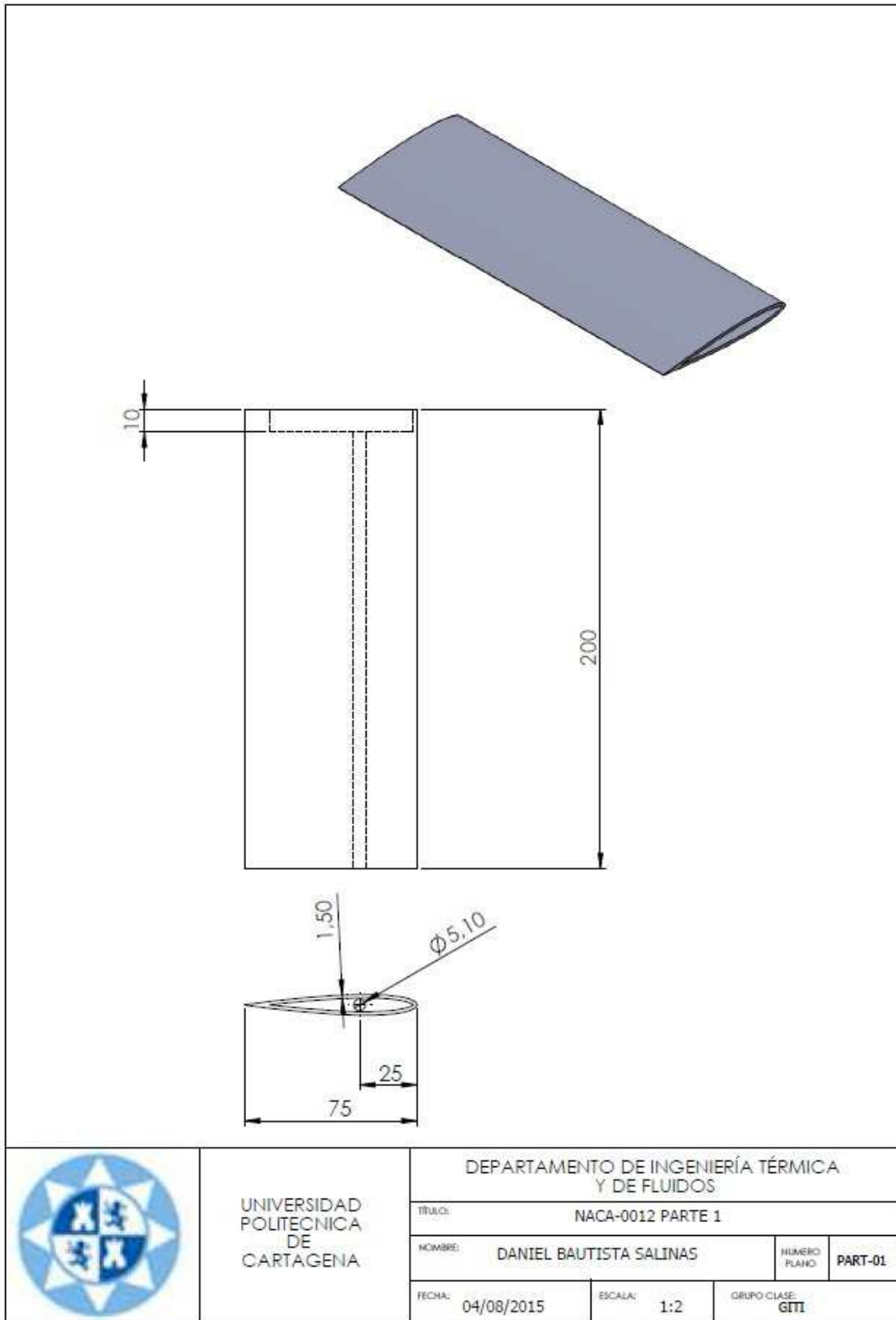


Figura V.3 Plano parte 1 perfil NACA 0012

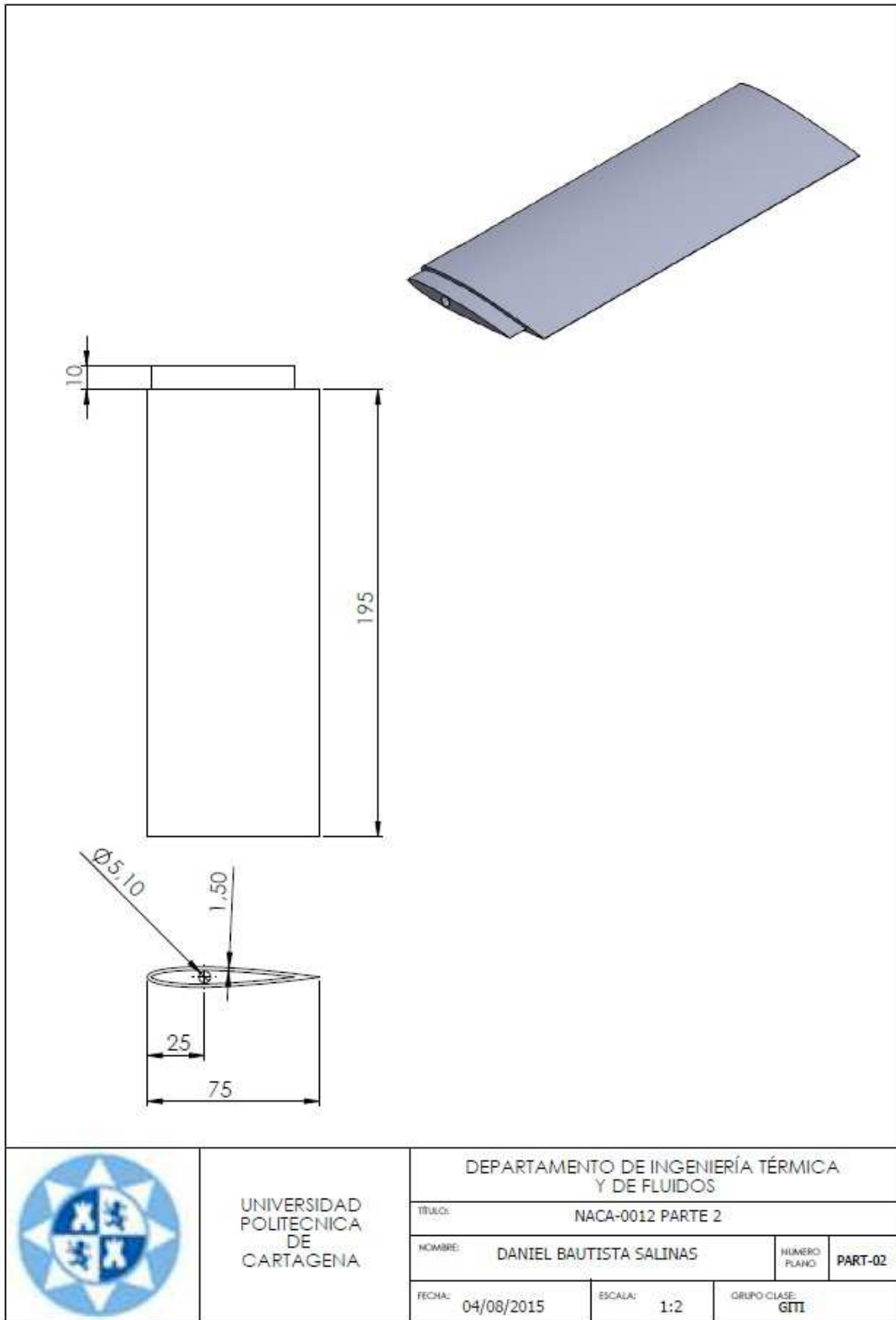


Figura V.4 Plano parte 2 perfil NACA 0012