

Informe de Calibración

1. Introducción

Este documento describe todas las actuaciones realizadas en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica de Vehículos de la Universidad de Málaga con el fin de su correcta puesta a punto. Este primer paso es imprescindible para lograr realizar todo tipo de experimentos aerodinámicos en el mismo de la manera más exacta y reproducible posible.

En primer lugar se hará una descripción general del túnel de viento, así como de la instrumentación de la que se dispone para realizar tanto medidas cualitativas (visualizaciones), como de variables cuantitativas (velocidades, fuerzas y momentos) sobre los modelos con los que se quiera experimentar en su cámara de ensayo. A continuación, se describirán las actuaciones llevadas a cabo en el mismo con el objetivo de homogeneizar correctamente el perfil de velocidades en la cámara de medición, requisito imprescindible para poder realizar medidas reproducibles. Por último, se expondrá el procedimiento y los resultados obtenidos en la calibración de los distintos aparatos de medida.

2. Túnel de Viento

Se trata de una instalación para determinar las acciones de que puede tener el aire sobre un determinado objeto, la cual se basa en un conducto por el que se hace circular un flujo de aire de características conocidas (uniformidad de velocidad e intensidad de turbulencia en la sección de referencia) en cuyo interior se coloca el cuerpo sobre el que se desea conocer la acción ejercida por el viento. En este caso se trata de un túnel de viento subsónico de baja velocidad y circuito cerrado. En la figura 1 se muestra un esquema general de la instalación, así como sus dimensiones principales.

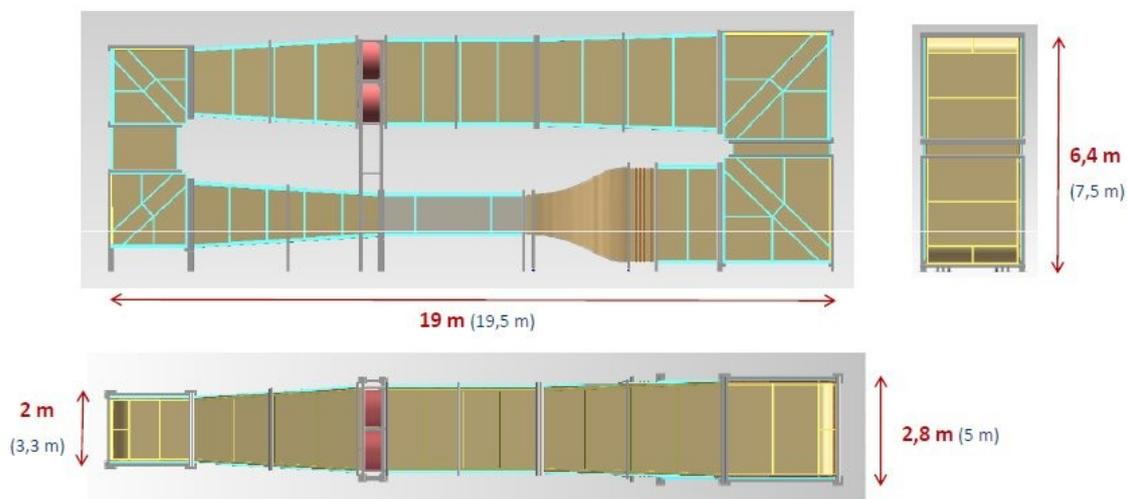


Figura 1. Esquema y dimensiones principales.

2.1 Elementos del Túnel de Viento

A continuación se detallan cuáles son los principales elementos de los que consta la instalación así como sus principales características:

- Sistema de IMPULSIÓN: está formado por una matriz de 2x2 ventiladores con una potencia total instalada de 60kW, que permite alcanzar una velocidad máxima aproximada de 50m/s y un caudal máximo de 7200m³/h. Dichos ventiladores son de la marca SODECA y modelo HCT-100-4T-20. Todos ellos están conectados de manera individual a su correspondiente variador de frecuencia (EMERSON Commander SK), lo que permite controlar la velocidad de circulación del aire con gran precisión.
- Acondicionamiento del FLUJO: el objetivo de esta sección es reducir el nivel de turbulencia de la corriente antes de alcanzar la cámara de ensayo. La intensidad de turbulencia requerida dependerá del tipo de ensayo a realizar: 3% para ingeniería civil ó 0.1% para ingeniería aeronáutica. En el caso analizado, este sistema consta de una malla formada por huecos de geometría circular de 5mm de diámetro fabricada de material polimérico (*honeycomb*), más dos rejillas metálicas con una luz de paso de 2mm.
- CONTRACCIÓN: está situada después de la sección de acondicionamiento del flujo y tiene una forma tridimensional simétrica curva tipo *spline* que permite que el flujo alcance una reducción de sección de 6:1 de manera suave sin que apenas se produzca desprendimiento de la capa límite. Este elemento, junto con las mallas de la zona de acondicionamiento del flujo, son las secciones críticas que van a determinar la calidad del perfil de velocidad del aire en la cámara de ensayos.
- CÁMARA DE ENSAYO: la cámara de ensayo posee unas dimensiones de 4m de longitud y una sección cuadrada de 1mx1m. Posee unas zonas frontal y superior de cristal y una inferior y posterior de madera. La puerta de acceso tiene unas dimensiones de 2x1m. Posee en su interior una balanza sobre soporte circular así como accesos para montar la instrumentación de medida.
- DIFUSOR: con el fin de que el flujo recupere parte de la energía total antes de alcanzar de nuevo la zona de impulsión, pasa por este ensanchamiento suave de la sección que tiene una relación de áreas 1:6 y ángulo de 3°.
- CODOS: situados en los extremos de la instalación. Con el fin de atenuar lo máximo posible la parición de flujos secundarios, están equipados con álabes guía con un arco de circunferencia de 90° y radio 0.4m. Son metálicos y tienen la pre-instalación necesario para equiparlos con un sistema de refrigeración adicional.

2.2 Instrumentación instalada en el Túnel de Viento

Además del túnel en sí, se dispone de una serie de instrumentos que permiten medir las principales magnitudes físicas de la corriente de aire que pasa por la cámara de ensayos y que se enumeran a continuación:

- **BALANZA:** situada justo en el centro de la cámara de ensayos, es capaz de medir fuerzas y momentos en las tres componentes del espacio. Es de la marca ATI y el modelo es el SI - 32-2.5. En la tabla 1 se resumen los límites de operación y resolución (entre paréntesis) para cada una de las componentes de las fuerzas F y momentos M .

Tabla 1. Límites de operación para cada componente de la balanza.

F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
±32N (1/80N)	±32N (1/80N)	±100N (1/40N)	±2.5N·m (1/1000N·m)	±2.5N·m (1/1000N·m)	±2.5N·m (1/1000N·m)

- **SONDAS DE VELOCIDAD: PELÍCULA CALIENTE** y **TUBOS DE PITOT:** para medir el valor de la velocidad de referencia que atraviesa la cámara de ensayo se utilizan tanto un sistema de anemometría de hilo caliente, que en este caso, al ser bastante grueso (~1mm) se denomina de película caliente y tubos de Pitot. Estas sondas suelen estar situadas justo a la entrada de la cámara de ensayos a una altura de 50cm y lo suficientemente alejadas de las paredes laterales como para poder despreciar los efectos de pared (mínimo 10cm).

- En el caso de los sensores de hilo caliente son el modelo CTV200-BO300 de la casa KIMO. Su rango efectivo de medida abarca desde los 0 a los 20m/s. Estas sondas incorporan un sensor para medir la temperatura en un rango de 0 a 50°C con una precisión de 0.1°C.

- Los tubos de Pitot son también de la marca KIMO y del modelo CP202-BO, con un rango de medida que se extiende desde los 1000 a los 1000 mmH₂O, lo que equivale a un intervalo de velocidad de 0-100m/s.

- **SISTEMAS DE VISUALIZACIÓN:** para poder estudiar los patrones de flujo y estelas generadas por cualquier geometría dentro de la cámara de ensayos se recurren a dispositivos generadores de humo que permiten visualizar tales estructuras. En nuestro caso disponemos de dos aparatos distintos:

- Un generador Aerotech Smoke Generator System 90W que consume 60ml/hr de un aceite de queroseno refinado (Shell "Ondina EL") con punto de auto-ignición por encima de los 250°C. Este aparato genera un penacho continuo de humo, útil para estudiar estelas de modelos relativamente grandes.

- También se dispone de generador de pulsos Smoke Pulse Generator MS-405 (Smoke-Wire) de Sugawara LAB. INC. Utiliza un hilo resistivo de nicromo de 0.12mm de diámetro que al ser atravesado por un pulso de corriente eléctrica configurable de 50 a 300V es capaz de generar "hilos" de humo con una duración también configurable de 1 a 100ms. Esta máquina es capaz de generar líneas de corriente muy finas, útiles para visualizaciones en cualquier tipo de geometría.

3. Puesta a punto inicial del Túnel de Viento

Tras el montaje y comprobación por parte del fabricante de todos los equipos, se pasó a realizar los primeros experimentos de prueba. Utilizando el sistema de visualización de humo se observó que el perfil de la pluma no era uniforme, como sería de esperar, si no que presentaba una morfología totalmente turbulenta y nada estable, tal y como se observa en la figura 2.

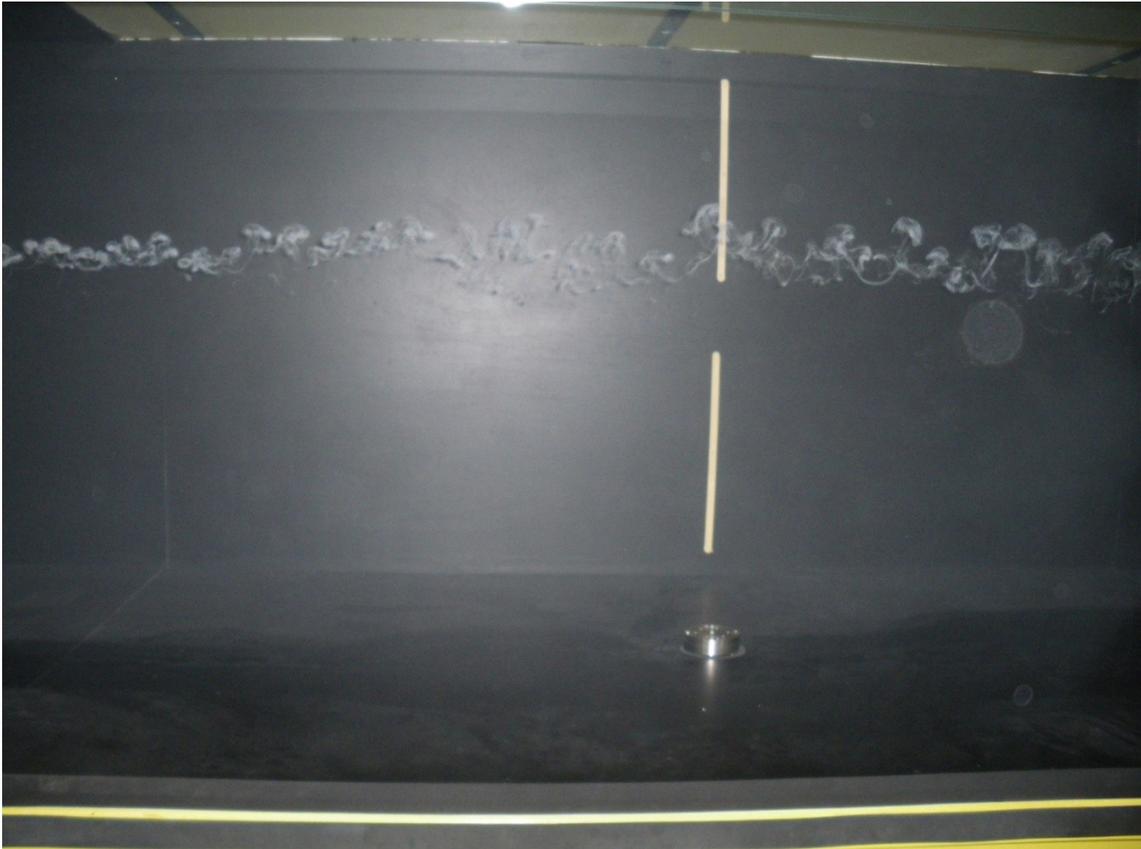


Figura 2. Situación inicial de la corriente.

Tras varias pruebas se averiguó que el culpable de este comportamiento nada deseable era la configuración del sistema de homogenización de flujo situado justo antes del *honeycomb*. Este constaba de cuatro paneles metálicos en disposición 2x2 en los cuales se ajustaba la malla metálica. Dicha disposición se puede ver en la figura 3.

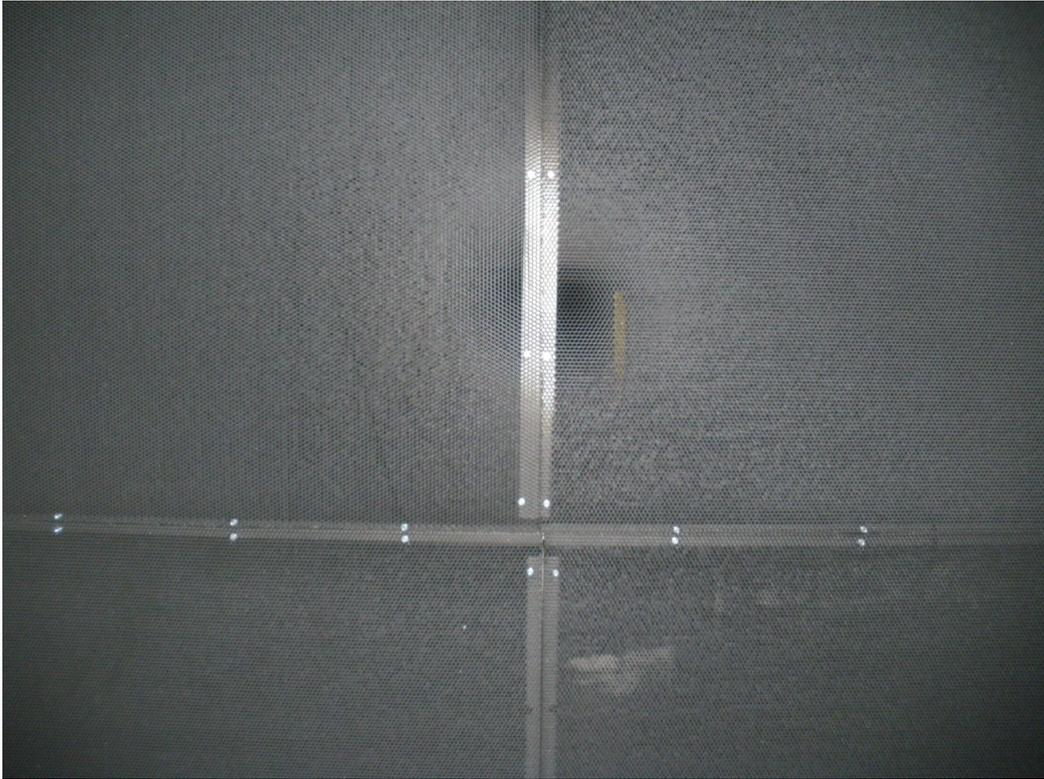


Figura 3. Disposición inicial del honeycomb.

Se procedió a eliminar dichos marcos, que eran la principal fuente de turbulencia y se procedió a coser las mallas unas con otras utilizando hilo de pescar de nylon, minimizando así las posibles fuentes de inestabilidad. El resultado de esta modificación se puede apreciar en la figura 4: una pluma homogénea y totalmente estable.

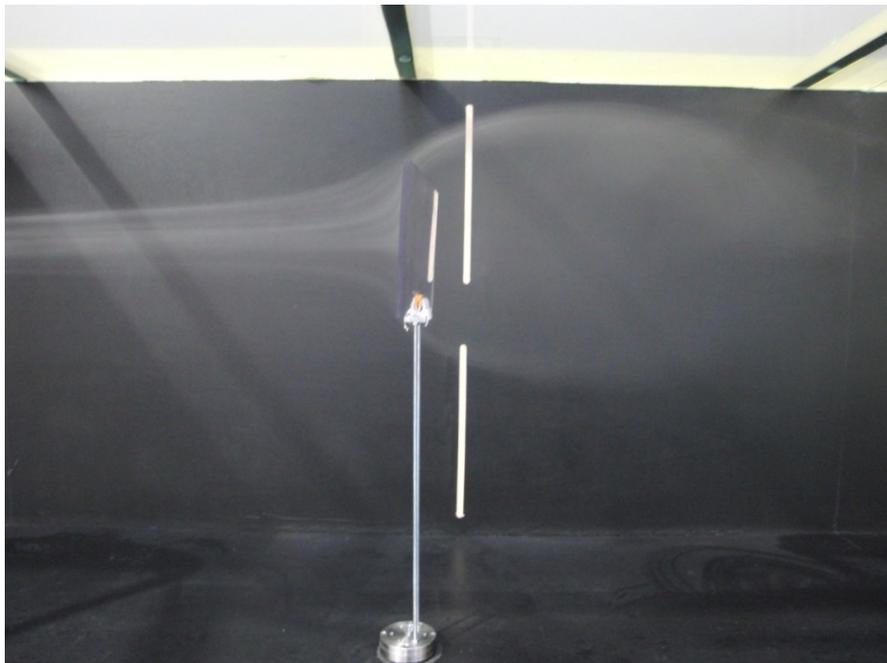


Figura 4. Situación final del flujo.

Finalmente, se añadió una red al final del difusor, tal y como se muestra en la figura 5 para evitar el que, si accidentalmente se desprende alguna pieza del modelo que se esté investigando en ese momento, se dañen los ventiladores o cualquier otra sección interna del túnel.



Figura 5. Red de seguridad.

3. Medias de Velocidad y Capa Límite

3.1 Calibración del sistema de Anemometría Térmica mediante medidas de Anemometría Láser

El sistema de anemometría térmica del túnel de viento se calibró comparando los valores de velocidad obtenidos para cada anemómetro de película caliente (designados HC1 y HC2 respectivamente) con los valores medidos con la técnica LDA (Laser Doppler Anemometry) para un determinado valor de consigna de velocidad de los ventiladores.

La tabla 2 resume los resultados obtenidos para cada caso, incluyendo sus respectivos errores experimentales, así como el nivel de intensidad turbulenta (ϵ) calculado como el cociente entre la incertidumbre de la velocidad y su módulo expresada en %. La consigna impuesta para cada caso está representada con el código Mxxxx-Cyy, donde xxxx indica qué motores están conectados e yy indica en % la consigna de los variadores de frecuencia empleada los motores. Los motores se encuentran numerados según la disposición que se indica en la figura 6.

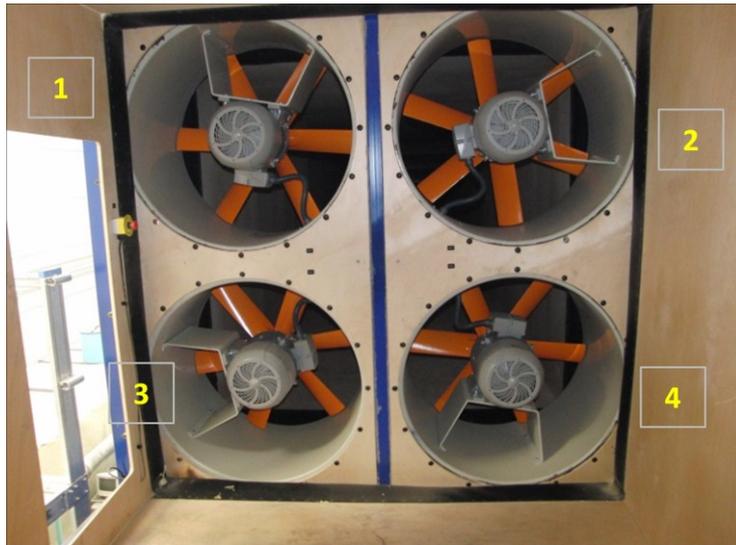


Figura 6. Disposición de los motores de los ventiladores de impulsión.

Tabla 2. Calibración del sistema de Anemometría Térmica.

Consigna	HC1 (m/s)	Δ HC1 (m/s)	HC2 (m/s)	Δ HC2 (m/s)	LDA (m/s)	Δ LDA (m/s)	ϵ (%)
M1234 - C13	12,2	0,3	12,4	0,3	9,94	0,16	1,6
M1234 - C10	10,7	0,3	10,7	0,3	8,55	0,16	1,9
M1234 - C7	8,8	0,3	8,9	0,3	7,08	0,14	2,0
M1234 - C5	7,6	0,3	7,7	0,3	6,14	0,12	2,0
M24 - C10	6,2	0,2	6,6	0,2	5,14	0,14	2,7
M24 - C5	4,5	0,2	4,8	0,2	3,77	0,06	1,6
M4 - C10	3,8	0,2	3,8	0,2	3,19	0,05	1,6
M4 - C5	2,6	0,2	2,7	0,2	2,34	0,05	2,1

La figura 7 muestra las rectas de calibración correspondientes a cada dispositivo. Este resultado es tremendamente útil para la operación cotidiana del túnel, ya que, tras imponer una determinada consigna a los ventiladores desde la consola de mando, el aire se impulsará a una determinada velocidad que será capaz de medir el sensor de película caliente que, a su vez, se podrá traducir a un valor de velocidad real a partir de la recta de calibración. De esta forma, para una determinada consigna, se puede saber la velocidad real del aire que circula por la cámara de ensayos con precisión.

En un futuro se modificará la electrónica de los anemómetros con el fin de incorporar dicha recta de calibración directamente.

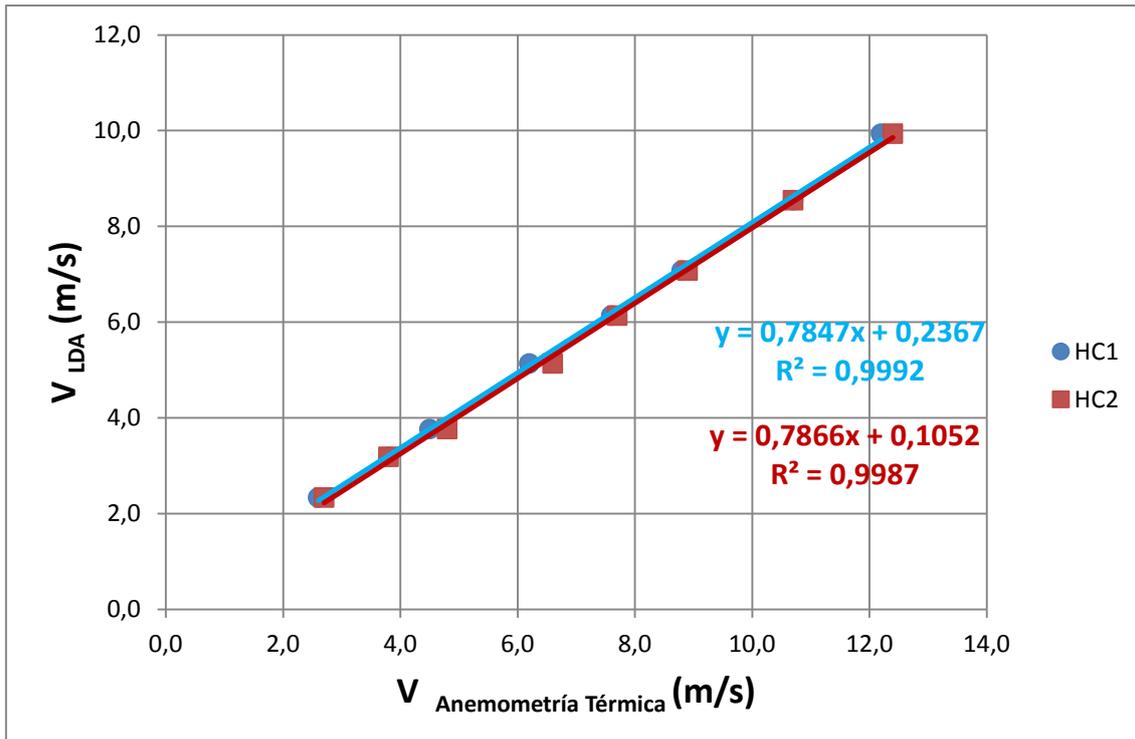


Figura 7. Calibración del sistema de Anemometría Térmica.

3.2 Calibración Tubos de Pitot mediante medidas de Anemometría Láser

El procedimiento explicado en el apartado anterior fue empleado nuevamente, pero esta vez para calibrar los tubos de Pitot de los que se disponen en el laboratorio de Aerohidrodinámica. En la tabla 3 se resume los resultados obtenidos para cada caso, utilizando la misma nomenclatura que en el caso anterior. Las rectas de calibración así obtenidas, se muestran en la figura 8.

Tabla 3. Calibración del sistema de Anemometría Térmica.

Caso - Consigna	V _{Pitot1} (m/s)	V _{Pitot2} (m/s)	V _{Pitot3} (m/s)	V _{LDA} (m/s)	±V _{LDA} (m/s)	Turbulencia (%)
1234 - 0%	3,0	3,4	3,7	4,7	0,05	1,1
1234 - 5%	5,6	5,9	6,8	6,9	0,10	1,5
1234 - 7%	7,1	7,8	8,0	7,9	0,12	1,5
1234 - 10%	8,3	8,4	8,4	9,4	0,11	1,2
1234 - 15%	10,4	10,6	11,6	11,8	0,15	1,3
1234 - 20%	12,9	13,0	13,2	14,2	0,15	1,1
1234 - 25%	15,3	15,1	15,5	17,0	0,17	1,0
1234 - 30%	17,3	17,8	18,1	19,7	0,44	2,2

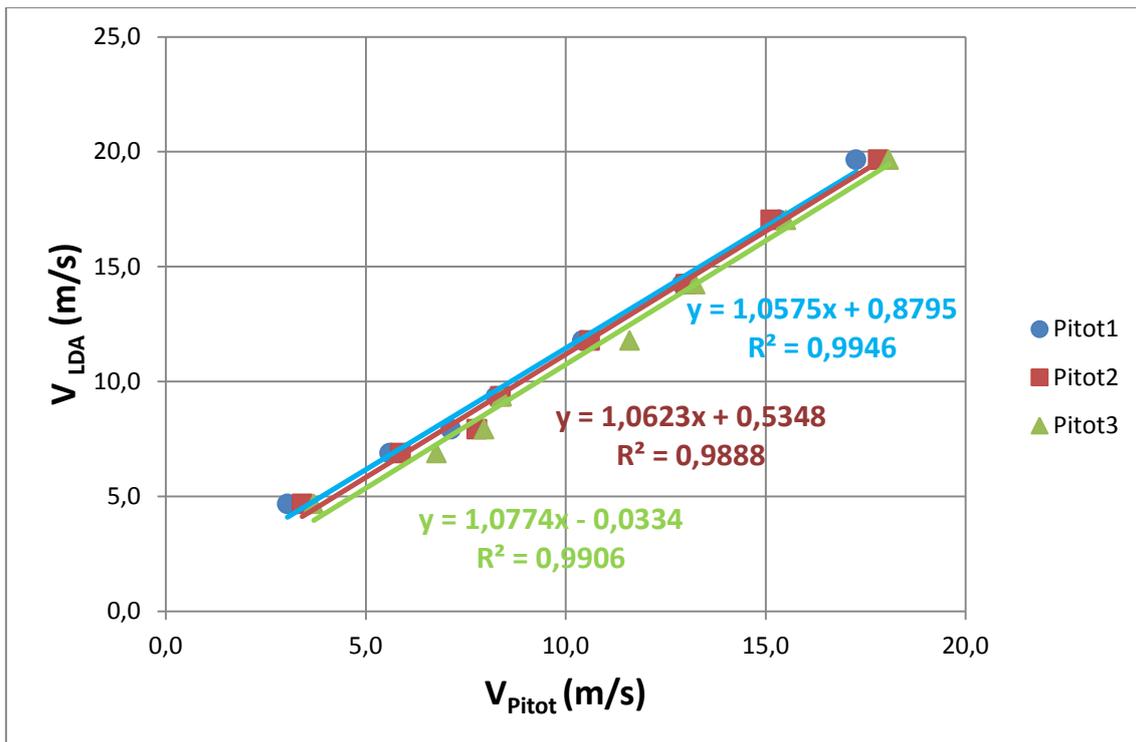


Figura 8. Calibración de los tubos de Pitot.

3.3 Capa Límite y Perfil de Velocidades en la Cámara de Ensayo

En las gráficas de la 9 a la 16 se muestran los resultados de velocidad medidos tanto con anemometría térmica como con LDA en función de la distancia desde la pared de la cámara de ensayo, para distintos valores de consigna de velocidad de los ventiladores. Las sondas estaban situadas justo en la entrada de la cámara de ensayo a una altura de 50cm respecto al nivel de la misma, tal y como se ha hecho en todos los casos hasta ahora.

Se encontró que el espesor máximo de la capa límite es de 20mm. Este resultado es muy bueno ya que indica que, para el rango de velocidades estudiado, el efecto de las paredes sobre las medidas será despreciable, ya que la sección característica de la cámara de ensayo es de 1000mm, por lo que se dispone de más del 90% de la sección libre para poder ocupar con el modelo y el sistema de medida, sin tener que aplicar coeficientes de corrección por los efectos de las paredes, aunque las recomendaciones prácticas aconsejan no utilizar una sección de bloqueo superior al 70% del total.

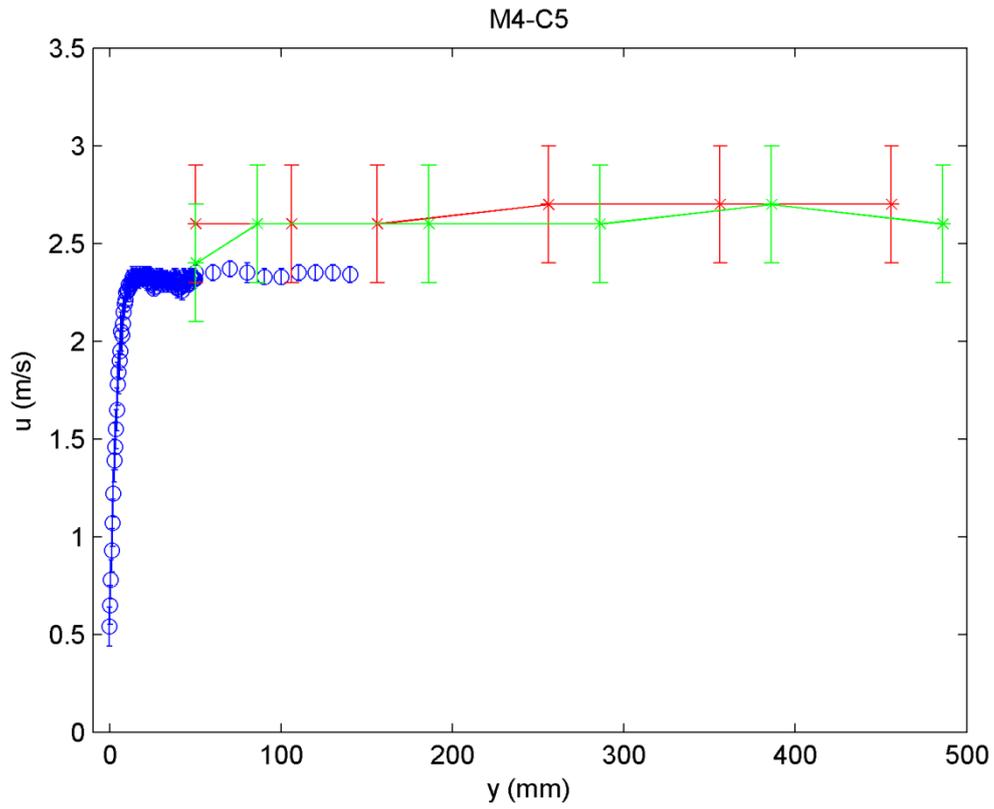


Figura 9. Resultados obtenidos para M4-C5.

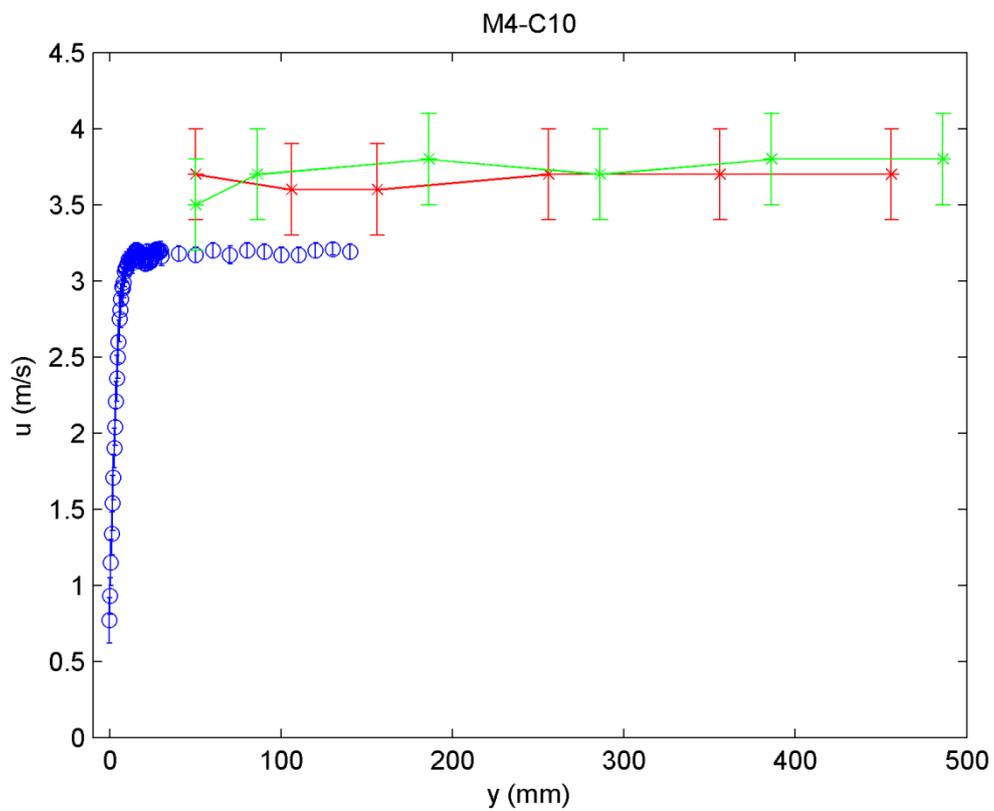


Figura 10. Resultados obtenidos para M4-C10.

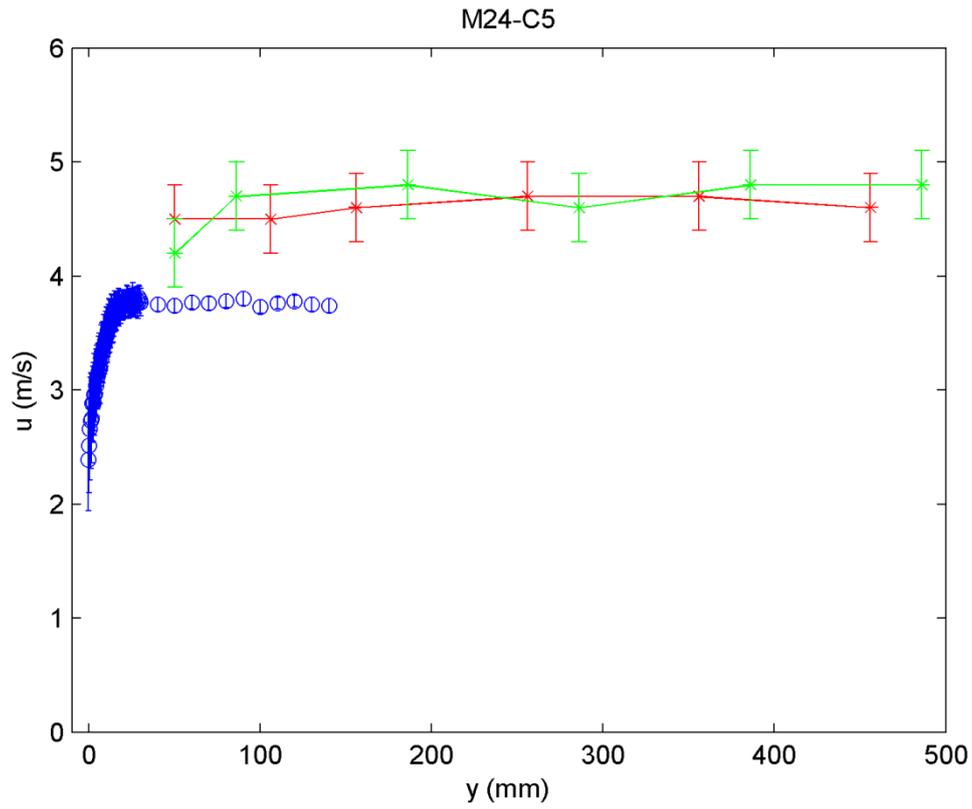


Figura 11. Resultados obtenidos para M24-C5.

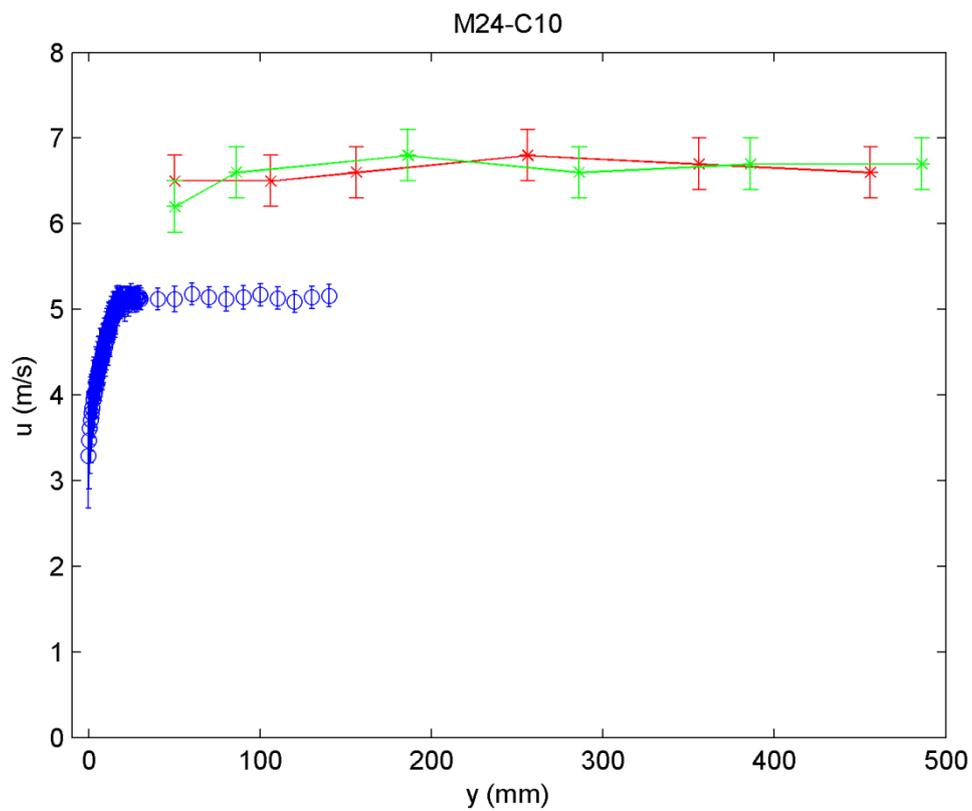


Figura 12. Resultados obtenidos para M24-C10.

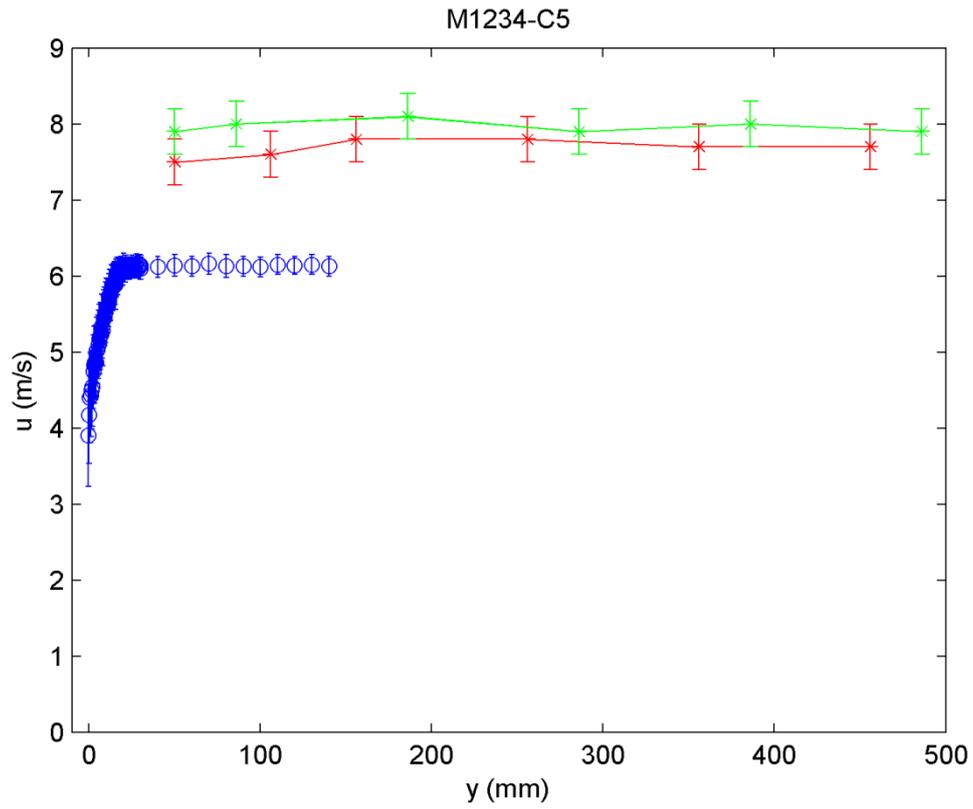


Figura 13. Resultados obtenidos para M1234-C5.

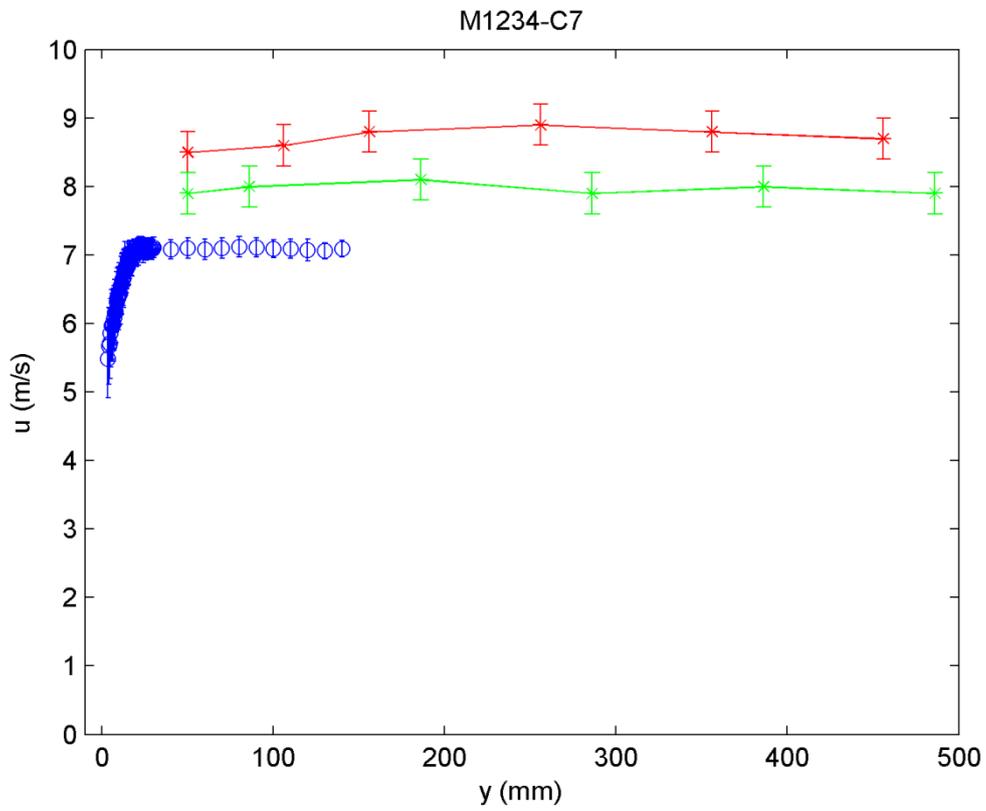


Figura 14. Resultados obtenidos para M1234-C7.

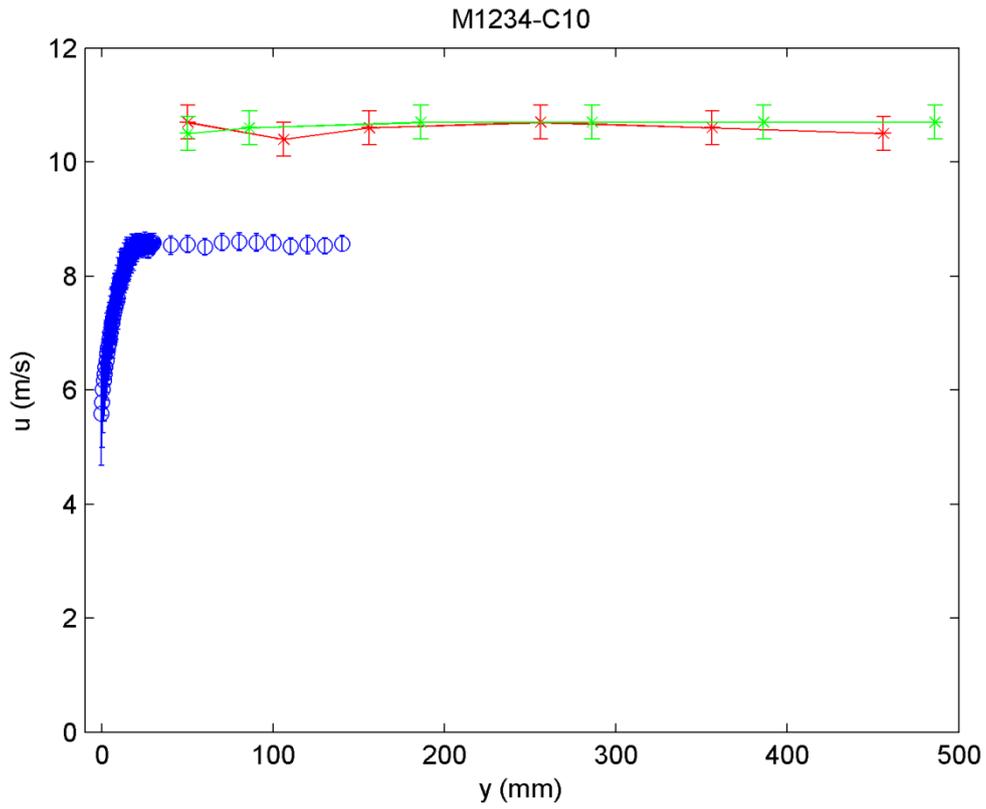


Figura 15. Resultados obtenidos para M1234-C10.

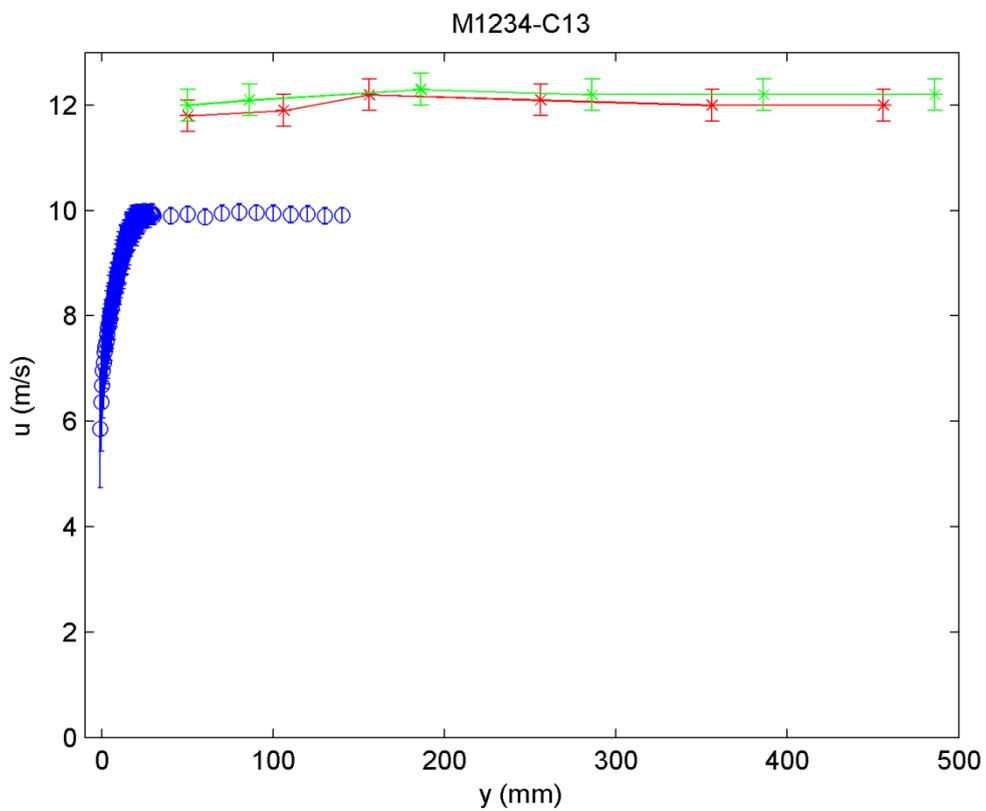


Figura 16. Resultados obtenidos para M1234-C13.

4. Intensidad de Turbulencia

Una vez calibrados los sensores de velocidad y determinado el espesor máximo de la capa límite, se procedió a medir la intensidad de la turbulencia en distintas secciones de la cámara de ensayo. La intensidad de la turbulencia es una medida de la fluctuación que tiene la velocidad en dicha sección. Mientras menor sea su valor, más uniforme será el perfil de velocidad y más precisos serán los experimentos que se puedan hacer en el túnel. Esta variable se define como el cociente entre la fluctuación media de la velocidad del flujo y su valor medio, tal y como se expresa en la ecuación (1):

$$I = \frac{u'}{\bar{U}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)}}{\sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}} \approx \frac{\sigma_U}{U} \quad (1)$$

En nuestro caso quedaría simplificada como el cociente entre la desviación típica de la velocidad y su media obtenidas ambas experimentalmente con la sonda de película caliente. Por otro lado, también se estimó la variación de la intensidad de la turbulencia con la distancia ($\partial I / \partial x \approx \Delta I / \Delta x$) que da idea de cómo es de intensa la variación de la intensidad con la distancia.

Este estudio se realizó en las posiciones numeradas cuyas coordenadas se muestran en la figura 17, para tres velocidades distintas. En cada posición se colocaba la sonda de película caliente de forma perpendicular al flujo y a una altura con respecto a la base de 500mm, es decir, justo en el plano central de la cámara de ensayos.

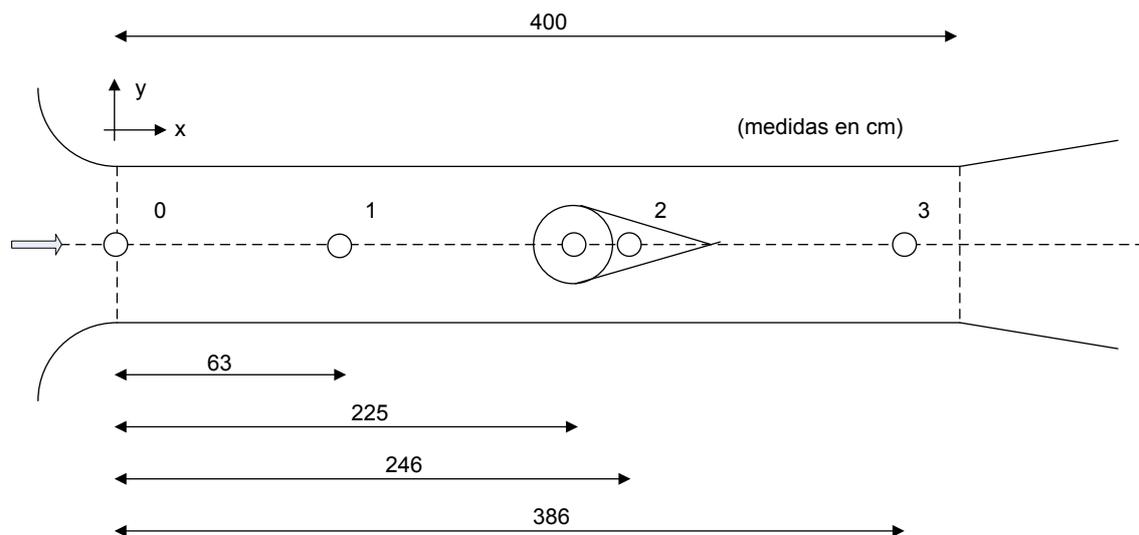


Figura 17. Sistema de coordenadas empleado en las medidas de turbulencia.

Las tablas de la 4 a la 6 muestran los resultados obtenidos para cada caso, así como la variación de la intensidad de la turbulencia (I) en función de la coordenada x. Dichos resultados se representan en las figuras 18 y 19 para tener una mejor comprensión de tal evolución.

Tabla 4. Intensidad de la turbulencia para $U=10\text{m/s}$.

10m/s		
x (cm)	I (%)	$\partial I / \partial x$
0	0,798	0,0020
63	0,902	0.0024
246	0,686	0.0018
386	0,362	-0,0023

Tabla 5. Intensidad de la turbulencia para $U=8.5\text{m/s}$.

8.5 m/s		
x (cm)	I (%)	$\partial I / \partial x$
0	0,738	0,0050
63	1,082	0,0020
246	0,708	-0,0020
386	0,568	-0,0010

Tabla 6. Intensidad de la turbulencia para $U=2.5\text{m/s}$.

2,5m/s		
x (cm)	I (%)	$\partial I / \partial x$
0	2,102	0,0240
63	3,582	0,0150
246	4,594	-0,0070
386	1,984	-0,0190

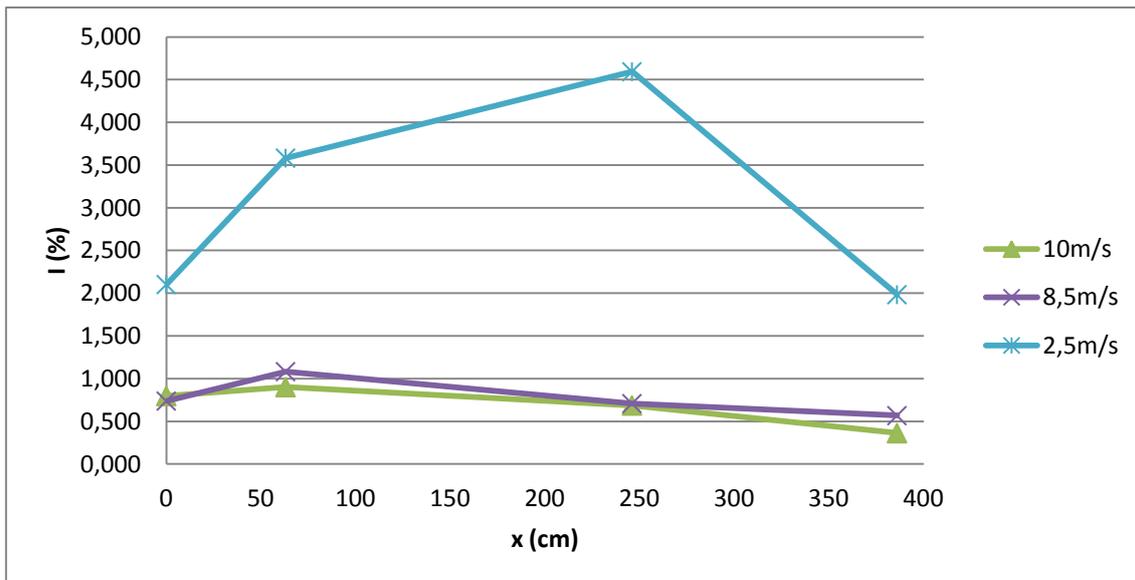


Figura 18. Evolución de I con la distancia.

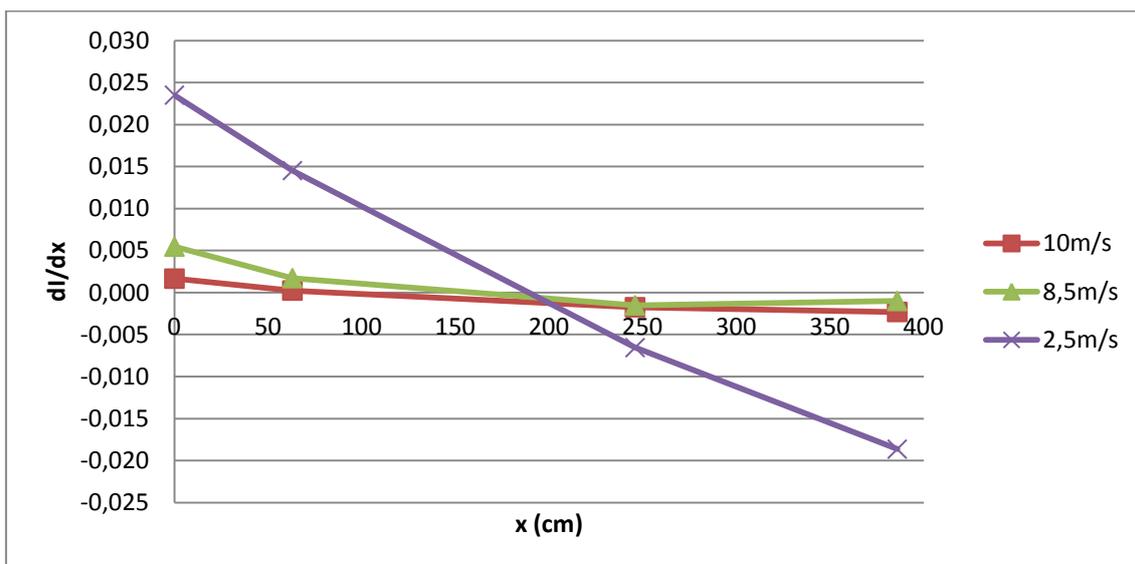


Figura 19. Evolución de $\partial I / \partial x$ con la distancia.

A la vista de los resultados, se puede concluir que a medida que nos alejamos de la entrada de la cámara de ensayos, la intensidad de turbulencia I disminuye levemente para valores de velocidad altos (dentro del rango estudiado). El comportamiento anómalo se produce para valores bajos de velocidad (2.5 m/s) en el que el valor de I es notablemente más grande. Por tanto, se puede concluir que habrá que evitar operar a velocidades muy bajas, ya que aquí, el perfil de velocidades obtenido por el túnel es poco uniforme. Aun así, la intensidad de turbulencia es muy baja para todos los casos en la sección donde se encuentra la balanza (pto. 2), que es donde normalmente se situarán los especímenes a estudiar. Respecto a la variación de de I con la distancia, para

consignas por encima del 10% apenas se nota, por lo que para esas velocidades se puede situar la geometría a estudiar en cualquier punto del eje central de la zona de ensayos.

A continuación, en la tabla 7 y en las gráficas 20 y 21 se resumen los resultados anteriores para la sección 2 del esquema mostrado en la figura 17, es decir donde se encuentran la balanza y el soporte para las maquetas.

Tabla 7. Intensidad de la turbulencia en el pto. 2 de la figura 17.

246cm		
U (m/s)	I (%)	$\partial I / \partial x$
10	0,6863	-0,0018
8.5	0,7085	-0,0015
2,5	4,5936	-0,0066

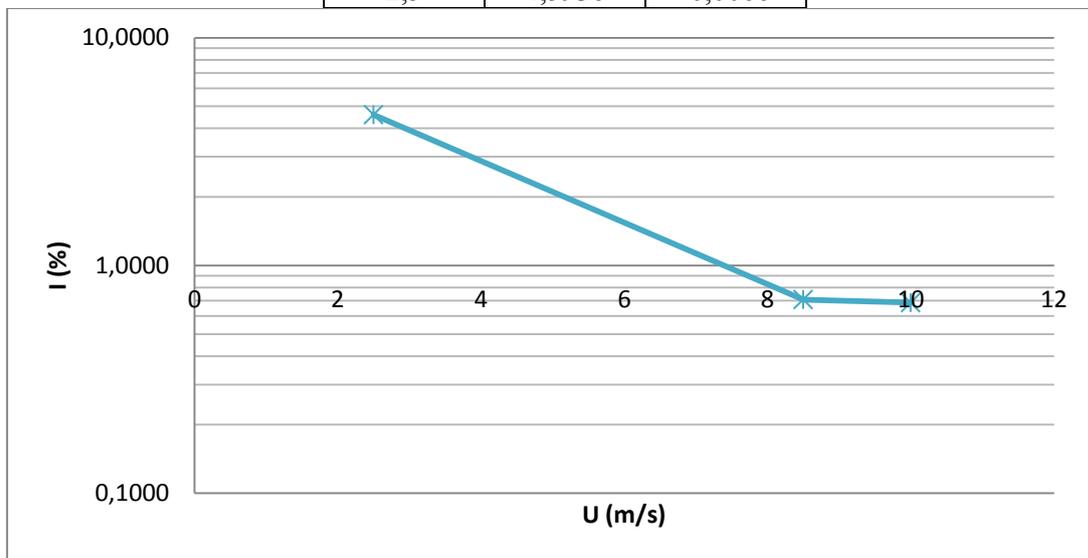


Figura 20. Evolución de I en la sección de la balanza.

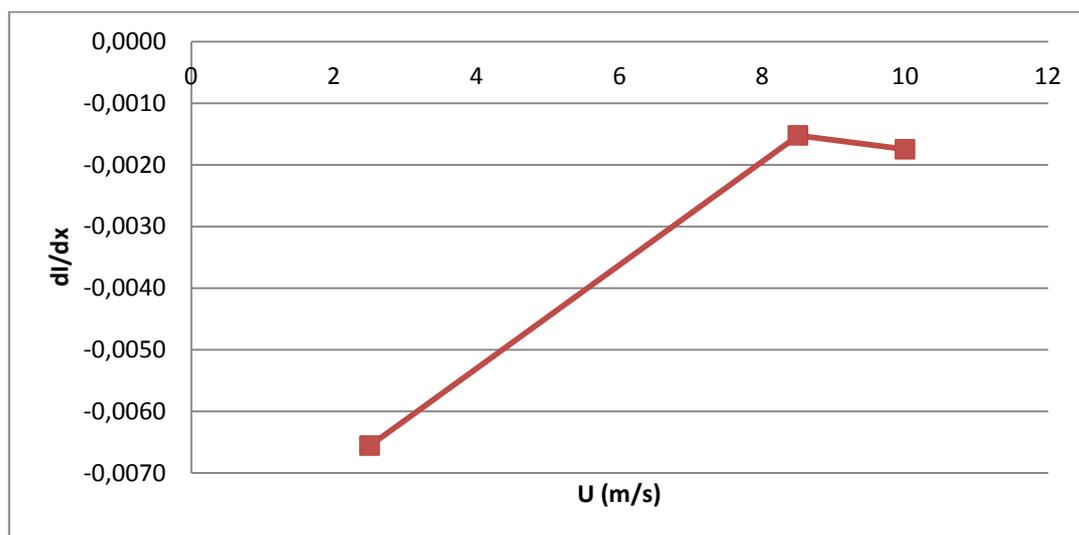


Figura 21. Evolución de $\partial I / \partial x$ en la sección de la balanza.

Queda a la vista que para valores de consigna por encima del 5% los valores de intensidad de turbulencia I se pueden considerar más que aceptables para un túnel de estas características al estar por debajo del 3%.

5. Calibración de la Balanza

Por último, se van a describir los ensayos realizados con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de la balanza, la cual se encuentra alineada con el nivel de la superficie inferior de la cámara de ensayos y está situada a la altura del punto 2 del esquema de la figura 17 (cota 225cm).

5.1 Calibración con dinamómetro

En primer lugar, se acopló al dispositivo un cuerpo cilíndrico macizo de acero de 15mm de diámetro y 400mm de altura. sobre él se adhirió un dinamómetro de precisión IS-VET 27003B. Con ayuda de dicho aparato se aplicaba una fuerza constante F_D en dirección axial y se comparó su valor con el medido por la balanza del túnel (F_b). Los resultados así obtenidos se resumen en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados de la balanza y el dinamómetro.

F_D (N)	F_b (N)	ΔF_b (N)	Error (%)
2	2,151	0,028	7,55
3	3,001	0,003	0,30
4	3,980	0,003	0,53
5	5,030	0,006	0,60
6	5,961	0,027	0,71
7	7,004	0,021	0,60
8	7,944	0,026	0,75
15	15,145	0,003	0,96

Se demuestra como para valores de fuerza pequeños, donde la balanza tiene la menor sensibilidad, el error es inferior al 1%, salvo para el caso de 2N, donde al encontrarse tan cerca del valor umbral mínimo que es capaz de medir el aparato, el error es bastante notable. Se concluye, por tanto, que la balanza se encuentra correctamente calibrada.

5.2 Evolución de la fuerza con el n° de Reynolds.

Con el mismo cilindro de 15mm de diámetro y 400mm de altura se midieron las fuerzas de la componente axial (eje OY en las coordenadas internas de la balanza) y en la componente vertical (F_z) con su correspondiente error experimental.

Tabla 9. Evolución de la fuerza con el n° de Reynolds.

Re	Fy (N)	ΔFy (N)	Fz (N)	ΔFz (N)
3741	0,02	0,01	0,03	0,03
4963	0,04	0,02	0,04	0,06
5684	0,05	0,01	0,08	0,03
7363	0,10	0,02	0,13	0,06
8808	0,17	0,04	0,17	0,05
9806	0,22	0,05	0,27	0,06
11231	0,33	0,04	0,38	0,05
12716	0,44	0,03	0,48	0,04

A medida que aumenta el número de Reynolds la incertidumbre la medida de las fuerzas no aumenta, por lo que se comprueba que la balanza tiene un funcionamiento estable.

5.3 Efectos de borde

Por último, se estudió el efecto de borde con un obstáculo de sección cuadrada de 10mm de lado y distintas alturas (7.5, 12.3 y 14.9cm) instalado sobre la balanza. Según los resultados mostrados en la tabla 10, para alturas inferiores a 20cm, o sea, para el coeficiente de bloqueo recomendado para un túnel de este tipo, la altura del obstáculo no influye en el valor de la fuerza registrado.

Tabla 10. Resultados del estudio del efecto de borde.

H (cm)	U (m/s)	ΔU (m/s)	Fz (N)	ΔFz (N)
7,5	4,84	0,08	0,05	0,03
12,3	4,90	0,09	0,06	0,03
14,9	4,91	0,11	0,06	0,03

