

## Medición de perfiles de velocidad en Túnel de viento

**Oscar Adrián Morales Contreras**

Universidad Autónoma de Baja California

[moraleso97@uabc.edu.mx](mailto:moraleso97@uabc.edu.mx)

**Antonio Gómez Roa**

Universidad Autónoma de Baja California

[gomez\\_roa@uabc.edu.mx](mailto:gomez_roa@uabc.edu.mx)

**Raúl Vázquez Prieto**

Universidad Autónoma de Baja California

[raul.vazquez.prieto@uabc.edu.mx](mailto:raul.vazquez.prieto@uabc.edu.mx)

### Resumen

Se implementa la práctica de la caracterización de la zona de pruebas del túnel de viento de baja velocidad ARMFIELD® C15 instalado en el Laboratorio de Ingeniería Aeroespacial del Centro de Ingeniería y Tecnología de Valle de las Palmas, con el objetivo de conocer los perfiles de velocidad en la zona de pruebas del Túnel, con 3 distintos números de Reynolds. Las mediciones se realizaron con un tubo pitot y manómetro inclinado proporcionados por el fabricante. De los resultados obtenidos se comprobó que se tienen perfiles característicos de flujo Turbulento.

### ABSTRACT

The characterizing of working section of the wind tunnel of low speed ARMFIELD® C15 installed at the Laboratory of Aerospace Engineering and Engineering Technology Center of Palms Valley, to obtain the velocity profiles in working section, 3 different Reynolds

numbers were analyzed. The measurements were made with a pitot tube and inclined manometer provided by the wind tunnel. The results showed that with turbulent flow characteristic profiles

---

## Nomenclatura

M = número de mach.

N es el número de mediciones individuales.

$P_{din}$  = Presión dinámica.

$P_e$  = Presión estática.

$P_t$  = Presión total.

Re = Número de Reynolds.

RH = Radio hidráulico.

u = velocidad promedio.

$u_0$  = velocidad del sonido.

$x_i$  = mediciones individuales.

$\bar{x}$  = valor promedio.

$\mu$  = viscosidad.

$\rho$  = densidad.

---

## Introducción

Al utilizar equipos para realizar experimentos, éstos deben ser caracterizados para conocer, en el caso del túnel de viento, la influencia de su geometría y accesorios en los experimentos que en él se practican, y el comportamiento del flujo para distintos regímenes de velocidad.

Un ejemplo de un estudio de caracterización es el realizado por Purtell y Klebanoff [1], quienes midieron con un anemómetro de hilo caliente, un tubo estático de Pitot y el anemómetro láser Doppler la velocidad en la zona de pruebas del túnel de viento del Instituto Nacional de Normas y Tecnología de Estados Unidos. La primera fase de la caracterización fue determinar la distribución de velocidad  $U$ , en las direcciones horizontal (Y) y vertical (Z) de la sección de pruebas, para velocidades en el centro de 5.37 m/s y 9.45 m/s a distancias de 1.00 m, 3.00 m y 5.00 m (en la dirección X) desde el inicio de la sección de pruebas. Sus resultados muestran que en ésta zona se tiene una variación de velocidad de  $\pm 1\%$ , tal como se indica en la figura 1.

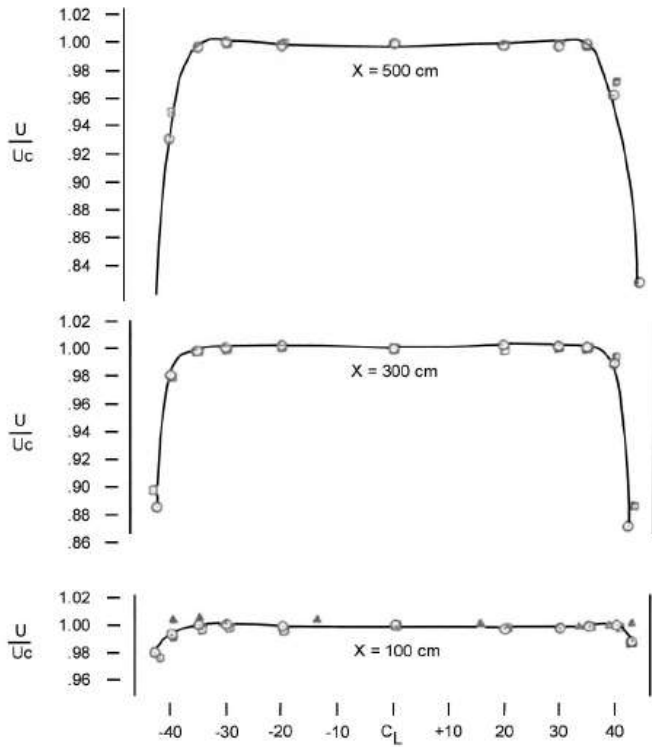


Figura 1. Perfiles de velocidad en eje “y” obtenidos por Purtell y Klebanoff [1].

Otra investigación que trata la caracterización de la zona de pruebas es la realizada por Ito y Kohama [2], quienes obtuvieron experimentalmente el comportamiento del flujo en el túnel de viento del Instituto de Ciencias de Fluidos de la Universidad de Tohoku de Japón, mediante perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia en diversas secciones del túnel. Las mediciones de los perfiles de velocidad y turbulencia en la sección de pruebas se realizaron con un anemómetro de hilo caliente marca DISA modelo 55M y un tubo de Pitot de 6 mm de diámetro. Entre sus resultados encontraron que los perfiles de velocidad presentan una variación de  $\pm 0.1\%$  en la zona central; además que el flujo es simétrico respecto a la línea central de la sección de pruebas (figura 2).

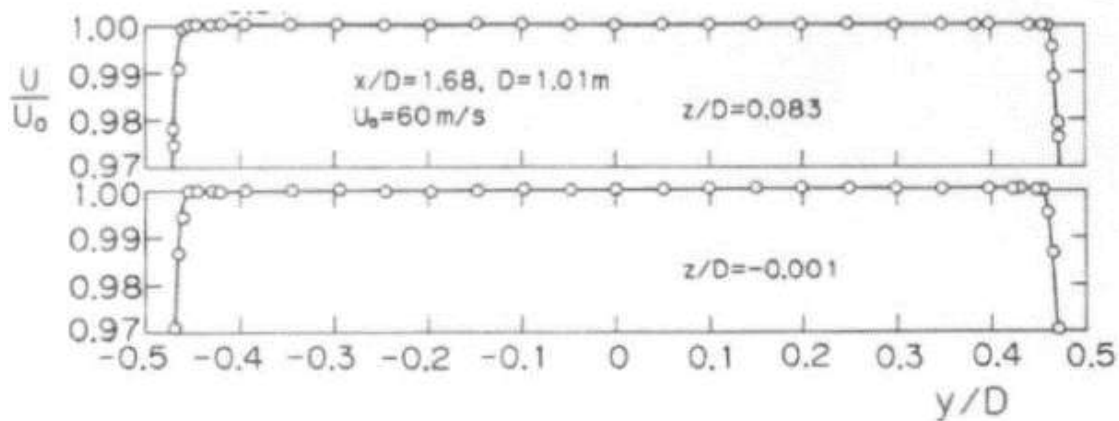


Figura 2. Perfiles de velocidad en eje "y" obtenidos por Ito y Kohama [2].

Una tercera investigación destinada al estudio de la caracterización de zona de pruebas es la realizada por Terao, Takamoto y Katagiri [3], quienes diseñaron y evaluaron tres arreglos de un túnel de viento en el Laboratorio Nacional de Investigación de Metrología de Japón, para un intervalo de velocidades de 0.045 m/s a 1.4 m/s. La evaluación la realizaron mediante perfiles de velocidad y turbulencia. Las mediciones se realizaron con un anemómetro láser Doppler de argón ionizado para una componente y un generador de humo para el sembrado de partículas. De los perfiles de velocidad de las tres configuraciones, el arreglo A presentó mayor uniformidad en la zona central ( $r/R = \pm 0.33$ ) con una variación de velocidad de  $\pm 2\%$ . En el arreglo B se obtuvo una variación de  $\pm 2.5\%$  y en el arreglo C una variación de  $\pm 4\%$ .

Una última investigación que trata la caracterización es la realizada por Tolentino et. al. [4], en el Túnel de Viento del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada del Instituto Politécnico Nacional. En este trabajo se diseñó y construyó una zona de contracción y entrada acampana para disminuir la turbulencia en la zona de pruebas. Para esto determinaron los perfiles de velocidad utilizando un tubo de Pitot para tres diferentes velocidades (5, 15 y 30 m/s). En su trabajo Tolentino encontró que la velocidad en la zona

central de túnel tiene una variación de  $\pm 2\%$  en la zona de corriente libre, tal como se observa en sus perfiles de velocidad mostrados en la figura 3.

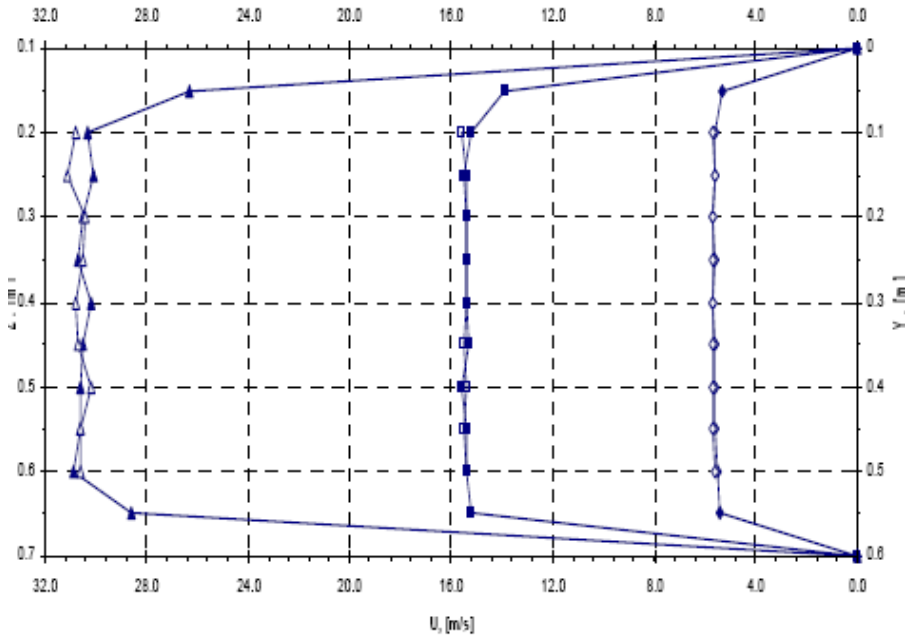


Figura 3. Perfiles de velocidad obtenidos por Tolentino [4].

## METODOLOGÍA

El túnel de viento con el cual se trabaja es el ARMFIELD C-15 [5], el cual se muestra en la figura 4 y cuenta con las siguientes características:



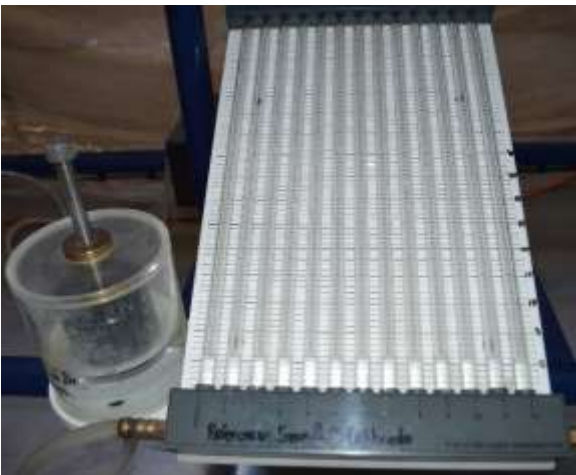
Figura 4. Túnel de viento subsónico Armfield C-15.

- 1.- Enderezador de flujo tipo panel colocado en la sección de contracción en la entrada, este accesorio sirve para tener flujo uniforme en la sección de pruebas. El panel es de forma circular tal como se muestra en la figura 5, esta forma de panel presenta un coeficiente de pérdida de 0.3.
- 2.- Sección de trabajo fabricada en material acrílico transparente que ofrece una excelente visibilidad de los modelos, cuya sección transversal es de 0.147 x 0.147 m.
- 3.- Un transductor de presión electrónico montado en la pared de la sección de trabajo que mide la presión estática, lo que permite calcular y visualizar en la computadora la velocidad del aire.



*Figura 5. Panel instalado en zona de contracción.*

4.- Manómetros inclinados de agua con precisión de 0.5mm H<sub>2</sub>O (figura 6).



*Figura 6. Manómetros inclinados a 30°.*

5.- El flujo de aire se genera con un ventilador axial accionado por un motor eléctrico de 0.51 kW de corriente directa en un intervalo de 230 a 400 volts.



En la figura 7 se muestra el tubo de Pitot utilizado en esta investigación, el cual se desplaza a lo largo del “eje z” y “eje y”, para obtener las mediciones de la presión estática ( $P_e$ ) y total ( $P_t$ ), para determinar la velocidad ( $u$ ) en los diferentes puntos de medición, mediante la ecuación:

$$u = \sqrt{\frac{2P_{din}}{\rho}} \quad (1)$$

Debido a la inclinación que el manómetro guarda respecto de la horizontal, es necesario corregir las mediciones de  $P_t$  y de  $P_e$ , por lo que el valor que se obtiene en el indicador se debe multiplicar por el Seno de  $30^\circ$ .

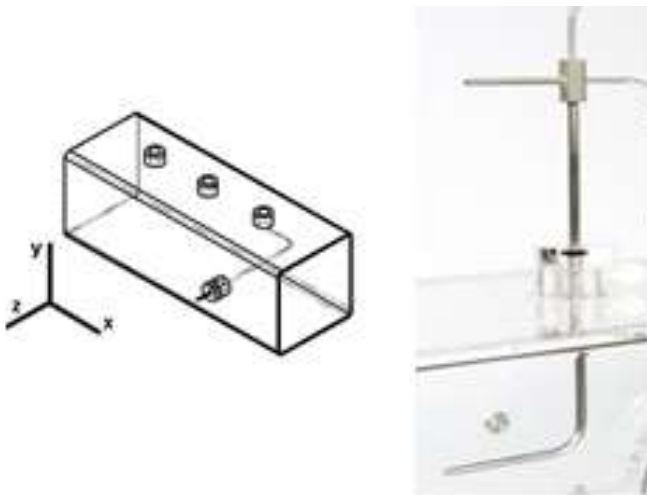


Figura. 7. Tubo de Pitot instalado en túnel de viento.

La distribución de los puntos para determinar los perfiles de velocidades se tomó en base a la norma AMCA 203-90 [6], la cual indica que las tomas deben distribuirse en secciones iguales y sugiere que se utilicen al menos 25 puntos de medición en la sección transversal.

Con esta distribución se midieron 6 perfiles de velocidad en total, 3 para el “eje y” y 3 para el “eje z”, cada uno para diferentes porcentajes de potencia del ventilador (caso A de 70%, caso B de 75% y caso C de 80%).

Las propiedades del fluido de trabajo fueron censadas utilizando la estación meteorológica marca Davis Instruments, la cual especifica una incertidumbre máxima del 0.5% en las mediciones de la presión atmosférica y 0.83% en las de temperatura. Con los datos obtenidos se calculó la densidad del aire en el laboratorio utilizando la metodología indicada por Becerra y Guardado [7].

Los resultados obtenidos en la medición de diferencia de presiones y velocidad son tratados estadísticamente. Para expresar el resultado de una medición Figliola y Beasley [8] indican que se debe calcular el valor promedio de la muestra (N) mediante la relación:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

Este valor a su vez se usa para calcular la desviación estándar de la muestra:

$$S_x = \left( \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right) \quad (3)$$

**RESULTADOS**

En la tabla 1 se muestran los valores de velocidad promedio encontrados en la zona de pruebas para los tres diferentes porcentajes de potencia del ventilador (casos “A” al “C”).

*Tabla 1.- Velocidad promedio en zona de pruebas.*

	Caso A) Pot. Vent. de 70%			
Eje y	23.72	±	2.50	m/s
Eje z	24.30	±	1.63	m/s
	Caso B) Pot. Vent. de 75%			
Eje y	25.58	±	2.61	m/s
Eje z	25.83	±	2.06	m/s
	Caso C) Pot. Vent. de 80%			
Eje y	27.10	±	2.90	m/s
Eje z	27.34	±	2.12	m/s

Para estos rangos de velocidad se obtienen los valores del número de Reynolds y Mach, mostrados en la tabla 2:

$$Re = \frac{u\rho 4RH}{\mu} \tag{4}$$

$$M = \frac{u}{u_0} \tag{5}$$

Tabla 2: Condiciones de flujo en zona de pruebas.

Velocidad promedio	Re	M
Caso a) 24.01 m/s	228387	0.070
Caso b) 25.71 m/s	244486	0.075
Caso c) 27.22 m/s	258926	0.079

De los resultados de la tabla anterior se considera que se tiene flujo turbulento ( $Re > 4000$ ) e incompresible ( $M < 0.3$ ) en la zona de pruebas estudiada.

En las figuras 8 y 9 se muestran los perfiles de velocidad obtenidos para los tres casos analizados para los ejes “y” y “z” respectivamente. Se puede observar que el flujo es turbulento y presenta un comportamiento uniforme a lo largo de la sección estudiada, sin embargo esto es originado por la zona de contracción en la entrada del túnel y el panel que se encuentra instalado en la misma, los cuales permiten obtener flujo uniforme en la zona de pruebas.

Este comportamiento concuerda con el indicado por White [9], quien especifica que el flujo en un conducto con sección de entrada aerodinámica estará descrito por varias zonas, tal como se muestra en la figura 10, siendo la primera conocida como de flujo inviscoso y uniforme.

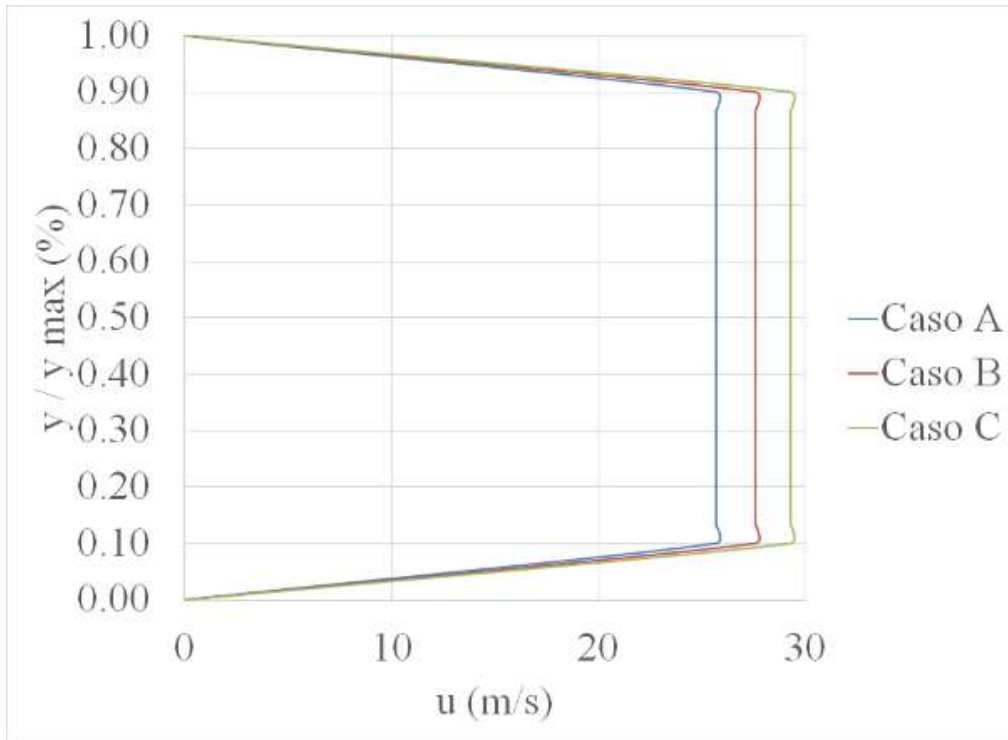


Figura 8. Perfiles de velocidad en "eje y".

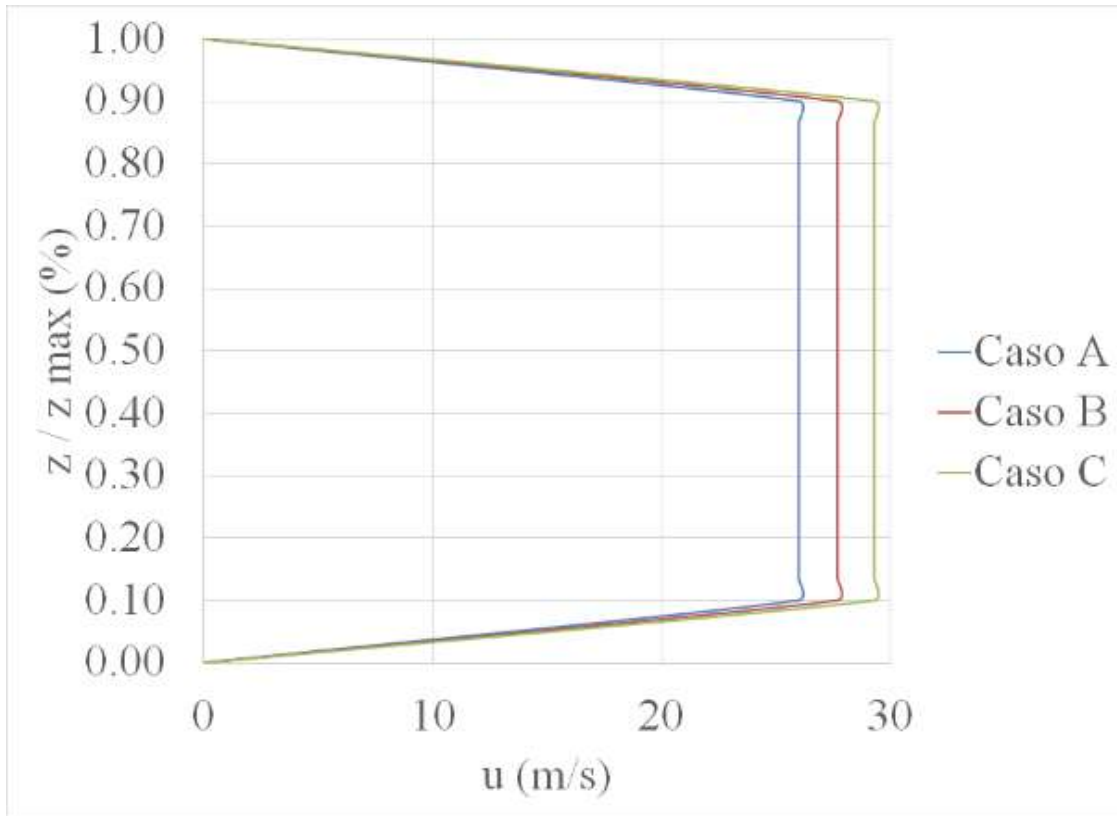


Figura 9. Perfiles de velocidad en "eje z".

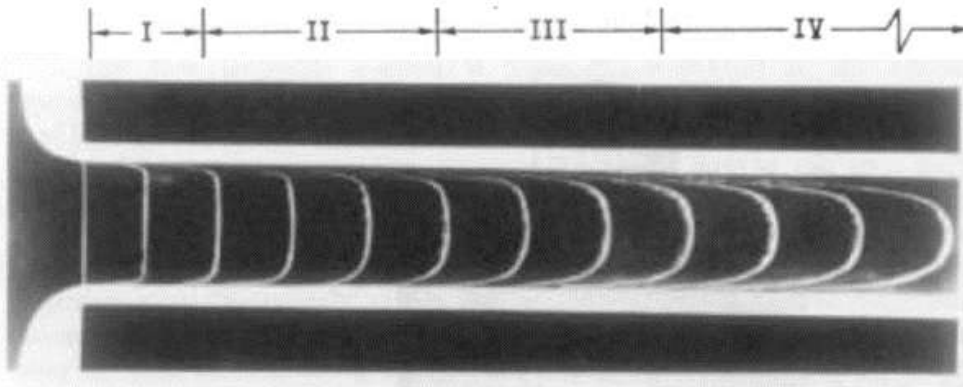


Figura 10. Flujo en conducto con entrada aerodinámica [9].

En las figuras 11 y 12 se muestran las mediciones realizadas cerca de la pared inferior, para determinar la capa limite en esta zona. Se observa que la altura de la misma para los tres casos no excede el 10% de la altura del túnel tanto para el eje “y” como para el eje “z”.

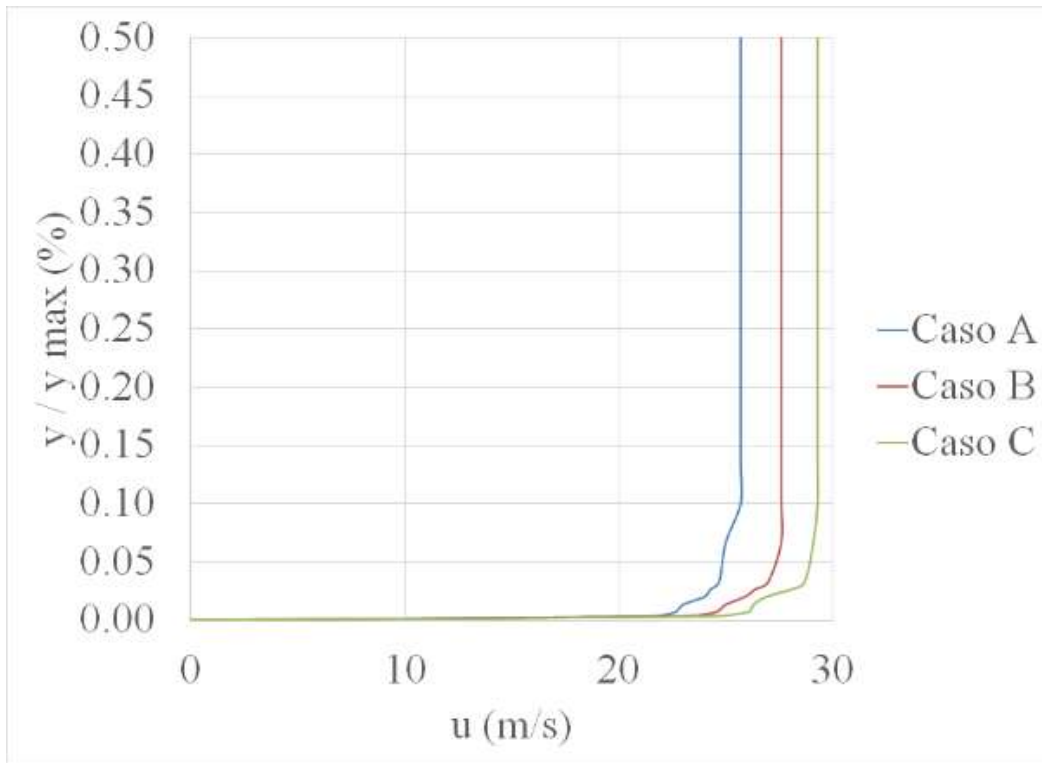


Figura 11. Capa limite “eje y”.

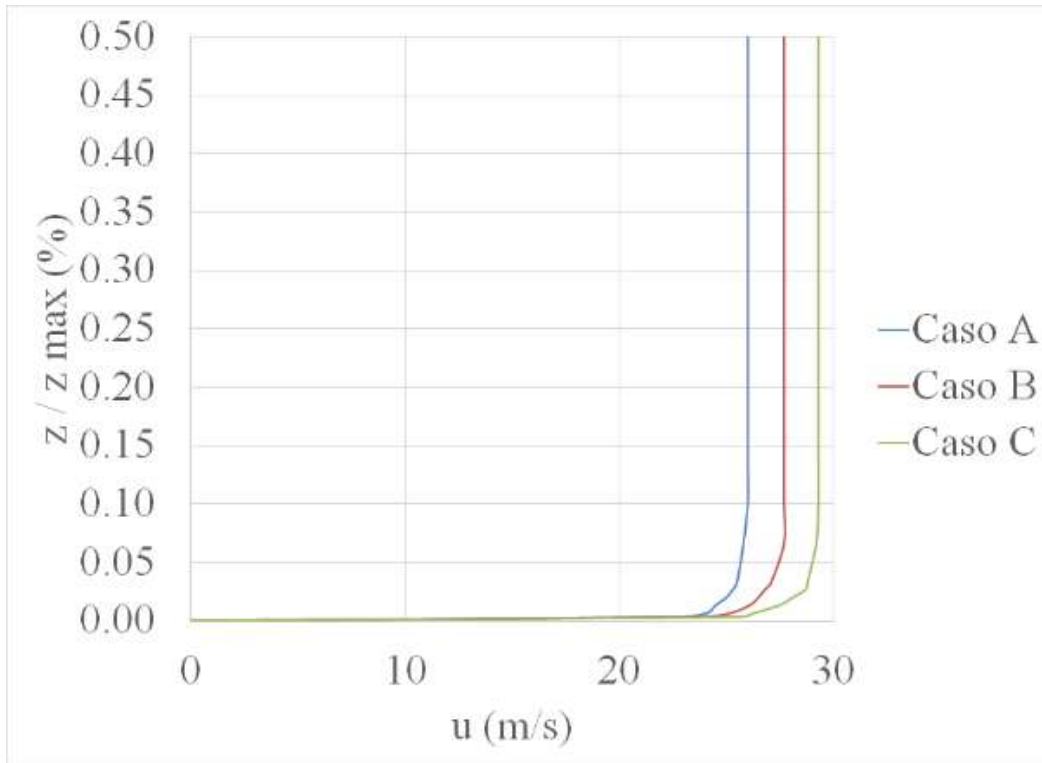


Figura 12. Capa limite “eje z”.

De estos resultados se puede determinar un área de medición dentro de la sección de pruebas del túnel de viento que garantiza un comportamiento uniforme y sin características extrañas, la cual puede acotarse en una sección de 13.7cm de longitud dejando 1 cm de su sección riginal por lado teniendo en cuenta que ahí el comportamiento del fluido es inestable por la fricción de los extremos que se comportan como una placa plana consiguiente al principio del cizallamiento con placas.

Teniendo en cuenta estas mediciones, se sugiere introducir en la zona de pruebas perfiles alares, maquetas u objetos aerodinámicos para su estudio que no rebasen un área de  $187\text{cm}^2$ , esta idea se presenta en la siguiente figura.



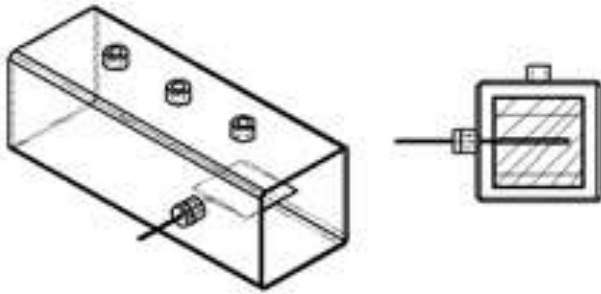


Figura 13. Área de comportamiento estable del flujo.

Para objetos aerodinámicos que se puedan analizar en esta zona de pruebas se observa que para una velocidad de 25m/s el número Reynolds global sería de aproximadamente 246135, esto indicaría que la capa límite puede considerarse laminar ya que  $Re < 5e^{10}$ . Para este cálculo se debe considerar la cuerda del objeto aerodinámico como la longitud característica.

## Conclusión

Se implementa la práctica de caracterización de la zona de pruebas del túnel de viento subsónico de la marca Armfield C-15 utilizado en el laboratorio de Aeroespacial de CITEC-UABC.

Se tiene flujo turbulento e incompresible en la zona de pruebas.

Los perfiles de velocidad tanto en el eje “y” como en el eje “z” son uniformes en el 80% de la sección central de la zona de pruebas analizada.

Los perfiles de velocidad encontrados, coinciden con los hallados por los otros investigadores indicados en este trabajo.

La precisión del instrumento de medición no permite analizar las variaciones de velocidad en la parte central de la zona de pruebas.

La sección de contracción y el panel instalado en el mismo permiten obtener un perfil de flujo uniforme en la zona de pruebas.

La capa limite tiene una altura de aproximadamente el 10% de la zona de pruebas.

## **RECOMENDACIONES**

Se propone agregar una entrada acampana al túnel de viento para reducir el espesor de capa limite en la sección de pruebas.

Se propone adquirir el sistema de manómetros electrónicos Armifield C-16 para poder apreciar las variaciones de velocidad en la zona de pruebas.

## **Bibliografía**

- (1) L. P. Purtell and P. S. Klebanoff, "A Low-Velocity Airflow Calibration and Research Facility", National Bureau of Standards, Technical Note 989, 1979.
- (2) H. Ito, R. Kobayashi and Y. Kohama, "The Low-Turbulence Wind Tunnel at Tohoku University", Aeronautical Journal, Abril 1992.
- (3) Y. Terao, M. Takamoto and T. Katagiri, "A Very Low Speed Tunnel for Anemometer Calibration", Fluid Measurement and Instrumentation, FED Vol. 211, 1995.
- (4) R. Tolentino, M. Toledo, E. Tolentino y F. Sánchez, "Modificaciones al túnel de viento del LABINTHAP para mediciones de velocidad de aire desde 5m/s hasta 30m/s", Simposio de metrología, Octubre 2004.

- (5) URL: <http://www.armfield.co.uk>
- (6) American National Standard., “Laboratory Methods of Testing Fang for Rating”, ANSI/AMCA 210-85, ASHRAE Standard Approved by the American National Standards Institute. July 3, 1985.
- (7) L. Becerra y M. Guardado, “Estimación de la incertidumbre de la determinación de la densidad del aire”, CENAM, 2001.
- (8) R. Figliola and D. Beasley, 2Mediciones Mecánicas Teoría y diseño”, 3ª Edición., Alfaomega. 2003.
- (9) F.M. White, “Viscous Fluid Flow”, McGraw Hill, Second Edition, 1991.