



## 4<sup>to</sup> Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



# INFLUENCIA DE LA TURBULENCIA EN LAS CARACTERÍSTICAS AERODINÁMICAS DE PERFILES DE BAJO REYNOLDS

A. Aramburu Orihuela<sup>a</sup>, J. Morales<sup>a</sup>, S. Algozino<sup>a,b</sup> y J. Marañón Di Leo<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>UIDET de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Universidad Nacional de La Plata, calle 116 e/ 47 y 48, CP 1900, La Plata, Argentina. <http://www.unlp.edu.ar>

<sup>b</sup>CONICET. Avda. Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad. de Buenos Aires, Argentina.

**Palabras claves:** Turbulencia, Escala, Intensidad, Wortmann FX63-137, Cargas aerodinámicas.

### Resumen

---

El objetivo del presente trabajo consiste en modificar y caracterizar el perfil de velocidades turbulento dentro del túnel de viento de capa límite de la UIDET LaCLyFA para el estudio de la influencia de la turbulencia incidente en perfiles de bajo número de Reynolds. A tal fin se diseñó y construyó un sistema para modificar los parámetros característicos de la turbulencia incidente, el cual consiste en dos paneles (*honeycombs*) con celdas de sección circular de 50mm y 100mm de diámetro que permiten variar la escala de la turbulencia mediante la inhibición de los componentes transversales de la velocidad. Con los nuevos sistemas desarrollados se analizó, mediante anemometría de hilo caliente, la influencia que tienen la distancia del panel al borde de ataque y el diámetro de las celdas que conforman cada panel. Hecha la caracterización, se estudiaron los coeficientes aerodinámicos sobre un perfil al variar la escala ( $\lambda/c \cong 0,11$  a  $0,22$ ) manteniendo la intensidad constante ( $I \cong 2\%$ ). El ensayo se realizó con un perfil Wortmann FX63-137 midiendo a través de tomas de presión, para diferentes Reynolds y diferentes ángulos de ataque, la distribución de presiones sobre el mismo. Aumentar la escala aumenta el coeficiente de sustentación y la pendiente de la curva  $C_l$  vs  $\alpha$ ; así mismo se observaron ligeros aumentos en el coeficiente de resistencia y de momentos. Se analizó la distribución de presión con el fin de relacionar los resultados obtenidos, encontrando picos de succión en el borde de ataque posiblemente relacionados a la estructura turbulenta generada con los paneles.

---

## INTRODUCCIÓN

Se han realizado diversos estudios sobre las características aerodinámicas de perfiles de bajo Reynolds donde el flujo incidente es del tipo laminar. Sin embargo, esta no es una representación exacta de las condiciones en las que trabajan los dispositivos que utilizan este tipo de perfiles (pequeñas aeronaves, generadores eólicos, etc.) ya que se encuentran sumergidos en la capa límite atmosférica donde el flujo es turbulento. Cuando una estructura turbulenta interactúa con un ala, moviéndose a velocidad constante, el campo de presiones se modifica creando condiciones no estacionarias alrededor del ala lo que genera fluctuaciones en la sustentación y la resistencia de la misma. Con lo cual, el desempeño de los perfiles sumergidos en una corriente turbulenta es menos estable e impredecible debido a que existen parámetros de dicha corriente que afectan el campo de flujo y la capa límite del perfil.

Para describir la turbulencia se utilizan comúnmente dos parámetros: la intensidad de turbulencia ( $I$ ) que es una medida de la magnitud relativa de la velocidad de las fluctuaciones respecto a la velocidad media y la escala de turbulencia ( $\lambda$ ) que es una medida del tamaño característico de los vórtices relativos al tamaño del cuerpo en el flujo, descrito mediante los parámetros dimensionales de las fluctuaciones (espacio y tiempo). En condiciones controladas dichos parámetros pueden ser manipulados de forma semiindependiente, con lo cual es posible estudiar los efectos que cada uno tiene sobre el desempeño de un perfil alar. Si bien existen teorías respecto de la interacción de la turbulencia sobre perfiles alares, las investigaciones experimentales sobre el tema han sido poco frecuentes.

Kindelspire [1] investigó la performance de perfiles, específicamente el desarrollo y comportamiento de la capa límite, a bajo números de Reynolds en presencia de turbulencia. Observó que el aumento en la intensidad adelantaba la zona de transición laminar-turbulenta en el perfil; además, detectó incrementos en el espesor de la capa límite en los casos en los que la escala de turbulencia era del orden del espesor de la capa límite, para escalas mayores no observó cambios significativos.

Yap et al [2] experimentaron con dos tipos de perfiles (NACA 0015 y Eagle 150) generando turbulencia con intensidad en el rango de 2,4% a 5,4%. Los resultados mostraron que al aumentar la intensidad se retrasaba la entrada en pérdida del perfil aumentando tanto los valores del coeficiente de sustentación como el de resistencia.

Cao [3] analizó la performance de un perfil asimétrico en presencia de un flujo turbulento generado por placas perforadas. Observó que la entrada en pérdida del perfil se retrasa conforme se aumenta la intensidad (Figura 1); en cuanto a los efectos de aumentar la escala de turbulencia a intensidad constante, observó que la pérdida ocurría a menores ángulos de ataque, debido a que la capa límite es menos susceptible al gradiente adverso en presencia de remolinos de menor escala. A su vez, obtuvo un aumento en el coeficiente de máxima sustentación y un aumento del coeficiente de resistencia luego de ocurrida la pérdida. Así mismo, notó que los efectos del cambio en la escala se hacen menos visibles a medida que aumenta la intensidad de turbulencia (Figura 2).

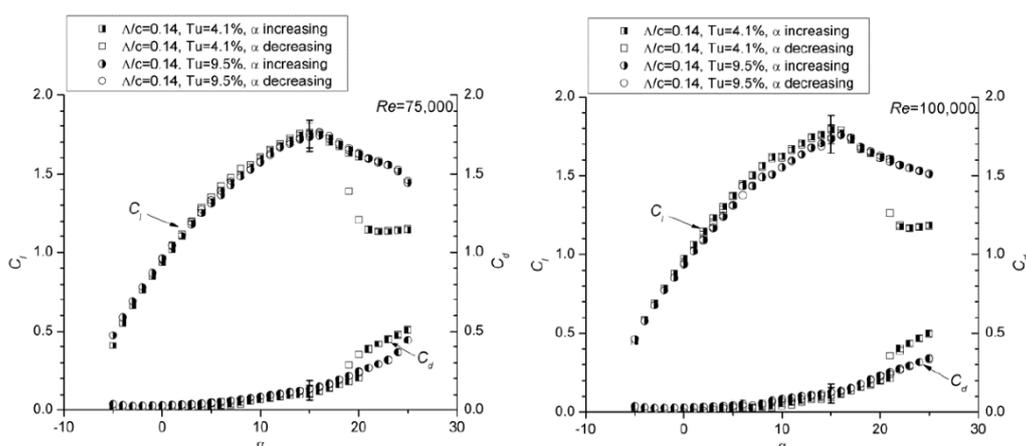


Figura 1: Comparación del  $C_l$  y el  $C_d$  al variar la intensidad de turbulencia a escala constante. (Fuente: Cao, 2010)

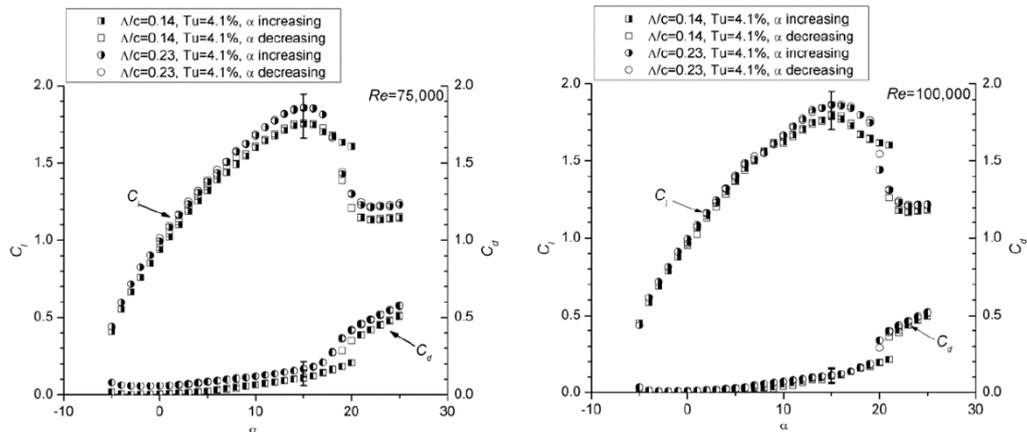


Figura 2: Comparación del  $C_l$  y el  $C_d$  al variar la escala de turbulencia a intensidad constante. (Fuente: Cao, 2010)

Ravi et al. [4] ensayaron perfiles delgados sin curvatura, variando la intensidad entre  $I = 1,2$  y  $12,6\%$  y la escala de turbulencia entre  $\lambda/c = 1$  y  $8$ . La consecuencia de aumentar intensidad a escala constante fue la de disminuir la pendiente de la curva polar de sustentación pero aumentar el coeficiente de sustentación máximo. Cuando incrementaron la escala de turbulencia a intensidad constante la pendiente de la curva polar crecía y el coeficiente máximo aumentaba.

En este contexto, el presente trabajo estudiará experimentalmente en túnel de viento la influencia de la turbulencia incidente sobre un perfil de bajo número de Reynolds en condiciones estáticas modificando la escala ( $\lambda/c \approx 0.11$  a  $0.22$ ) a intensidad constante ( $I \approx 2\%$ ). Para modificar los parámetros asociados a la turbulencia del flujo que ingresa a la zona de prueba del túnel de viento se utilizaron paneles (más conocidos como *Honeycomb*) compuestos por celdas, las cuales fueron construidas con tubos circulares, empaquetadas una contra otra. Estos elementos buscan variar la escala de la turbulencia mediante la inhibición de las componentes transversales de la velocidad, para lo cual el flujo debe atravesar delgados tubos que disminuyen los posibles vórtices que este pueda tener. Comúnmente la profundidad de dichos tubos debe tener entre 5 y 8 veces el diámetro de manera de encontrar el flujo totalmente desarrollado dentro de la celda, aunque algunos ensayos muestran que la inhibición ocurre, en su mayoría, cerca del inicio de las celdas[5]. Por otro lado, si la longitud de la celda es demasiado larga, la capa límite en cada celda crece y la pérdida de presión dinámica del túnel empieza a ser un factor importante debido a la pérdida de velocidad en la sección de prueba.

Por todo lo anteriormente expuesto, se decidió utilizar para los ensayos dos paneles de diferente diámetro y con una longitud equivalente a 5 veces el diámetro de celda. Con esto lo que se espera es estructurar el flujo incidente, es decir, generar un flujo cuyos parámetros (escala e intensidad) se mantengan uniformes en todo el área del túnel.

## METODOLOGÍA

Todos los ensayos se realizaron en el túnel de viento de la UIDET-LaCLyFA del Departamento de Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, el cual es un túnel cerrado con una sección de prueba de  $1,4\text{m} \times 1\text{m} \times 7,5\text{m}$ , y una velocidad máxima de  $20\text{ m/s}$ . El perfil utilizado fue un Wortmann FX 63-137, construido en fibra de vidrio, con una envergadura ( $b$ ) de  $0,75\text{ m}$  y cuerda ( $c$ ) de  $0,25\text{ m}$  y dotado de tomas de presión ubicadas a lo largo del extradós (25 tomas) y el intradós (7 tomas).

Con el objetivo de separar las características aerodinámicas de un perfil de los efectos tridimensionales de un ala, se colocaron en el túnel dos paneles removibles entre los cuales irá ubicado el perfil (Figura 3). Estos paneles se utilizaron tanto en la caracterización del flujo como en la medición de la distribución de presiones sobre el perfil; aunque en el primero no se utiliza el perfil, esto permite mantener las mismas condiciones de flujo incidente en ambos ensayos.

Además se construyeron dos paneles (*honeycombs*) que cubren en su totalidad la sección del túnel de viento (Figura 4). Para su realización se optó por utilizar tubos de PVC de  $50$  (P2) y  $100$  (P4) milímetros de diámetro (Tabla 1).

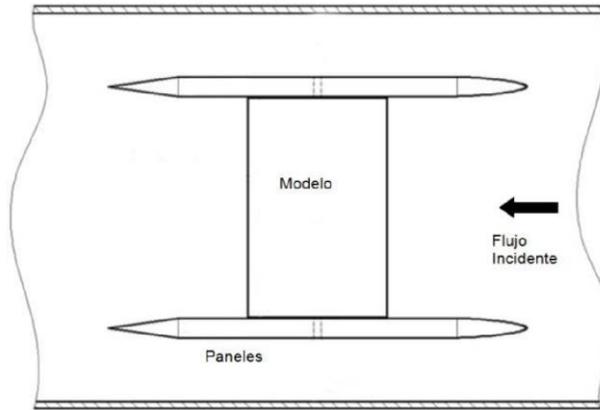


Figura 3: Vista superior de los paneles en el túnel de viento.

Panel	Diámetro de celda (D) [mm]	Longitud (L) [mm]	D/L
P2	50	250	5
P4	100	500	5

Tabla 1: Parámetros geométricos de los paneles.

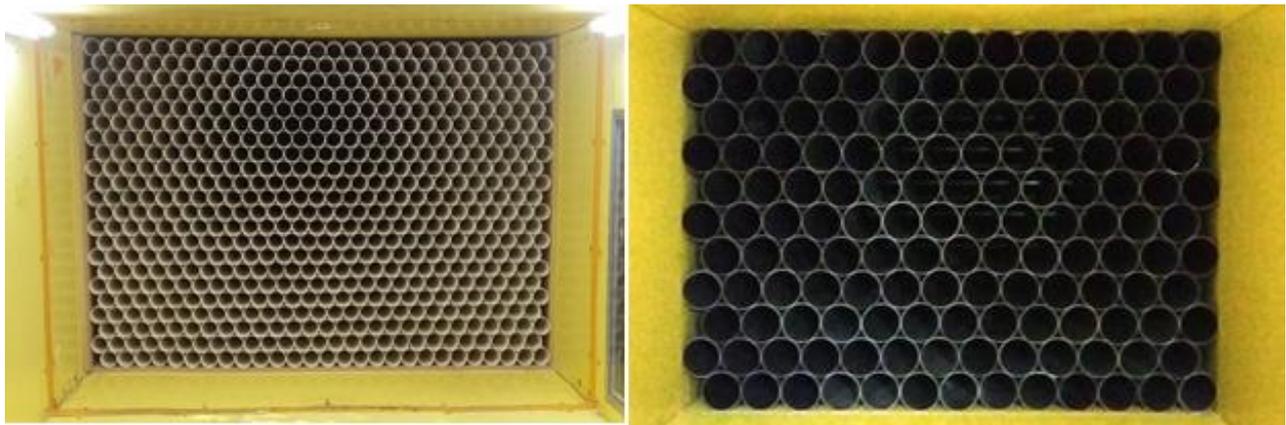


Figura 4: Paneles (Honeycomb) de 50 mm y 100mm.

## Caracterización del flujo

Para caracterizar el flujo se definieron dos configuraciones:

La primera configuración (M1) con la cual se determinó la distancia ( $d$ ) adecuada, entre el borde de ataque del modelo utilizado y los paneles (*honeycombs*), que permita una variación en la escala de turbulencia manteniendo la intensidad constante. Para ello se realizaron mediciones con el túnel limpio (sin el perfil) evaluando 3 distancias diferentes para cada uno de los paneles (Figura 5), determinadas en función de lo estudiado por otros autores [6],[7]. Los parámetros de turbulencia se obtuvieron del campo de velocidades instantáneas medidas mediante un sistema de anemometría de hilo caliente (DANTEC Streamline 90C10) con sensores dobles (Fiber Film probes 55R51) que fueron colocados en un posicionador vertical ubicado en el centro de la sección del túnel. Cabe destacar que la punta del anemómetro se colocó a la misma distancia a la cual estaría el borde de ataque del perfil, además se colocó un tubo Pitot- Prandtl que se conectó a un micromanómetro para medir la velocidad de la corriente libre. Los datos fueron adquiridos a una frecuencia de 2kHz con un filtro pasabajo a una frecuencia de 1kHz durante 8,192 segundos. El barrido de mediciones se hizo bajando desde una distancia de 24 cm por encima del ala hasta 24 cm por debajo con un paso de 2 cm, a una velocidad de corriente libre de 9 m/s medida a la altura que se encontrará luego el eje del ala ( $x = 0$  mm). Se analizaron las intensidades y escalas obtenidas para cada

distancia (Tabla 2). Luego para cada panel se eligió la distancia con la cual se obtengan diferentes escalas para intensidades iguales, comparando entre los dos paneles y el túnel sin panel.

En la segunda configuración (M2) se caracterizó la sección completa del túnel una vez definida la distancia a la cual se ubicaría cada panel. Se tomaron mediciones al igual que en la primera configuración pero esta vez se cubrió la totalidad del plano transversal a la corriente libre para ello se ubicó el posicionador a 33 cm (estación A y E) y 15 cm (estación B y D) hacia un lado y el otro del centro de la envergadura como así también sobre este eje (Figura 6).

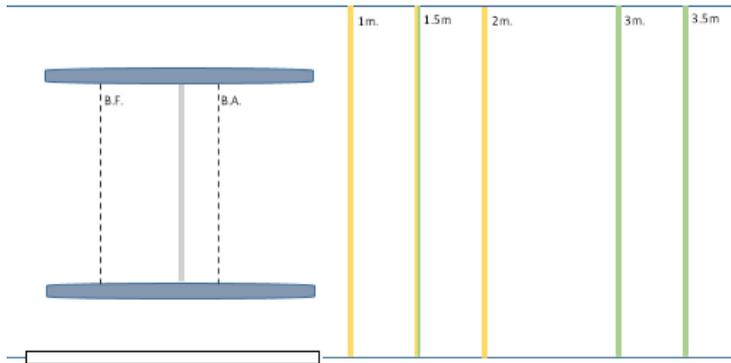


Figura 5: Distancias (D) evaluadas (amarillo para P2 y verde para P4).  
Vista superior.



Figura 6: Diagrama de ubicaciones del posicionador. Vista posterior.

### Medición de la distribución de presiones

Se ubicó el perfil entre los paneles móviles y se colocó un tubo Pitot-Prandtl que permitía medir la velocidad de la corriente libre (Figura 7). La distribución de las tomas de presión sobre el perfil se muestra en la Figura 8. Para realizar la medición con cada panel (*honeycomb*) se realizó un barrido en ángulo de  $-10^\circ$  a  $24^\circ$  con un paso de  $1^\circ$  al principio y al final, y con un paso de  $2^\circ$  en la zona de variación lineal del coeficiente de sustentación. Esto se hizo con el fin de obtener una mayor precisión en la zona de pérdida del ala. Las mediciones se realizaron con tres velocidades (6 m/s, 9 m/s y 12 m/s) correspondientes a un Reynolds de 100000, 150000 y 200000 respectivamente. La adquisición de presiones se realizó de manera simultánea para las 32 tomas a una frecuencia de 500 Hz durante 8 segundos utilizando dos módulos Scanivalve DSA 3217. Se obtuvieron 4096 muestras por cada medición que luego se analizaron empleando métodos estadísticos.



Figura 7: Ubicación del perfil en el Túnel de Viento

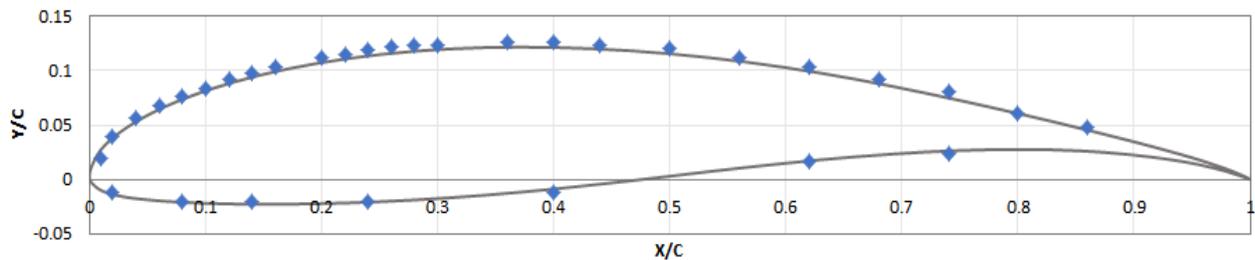


Figura 8: Distribución de tomas de presión sobre perfil.

## Medición de Presión Estática

Debido a que los datos fueron obtenidos en un túnel de viento, se deben realizar correcciones sobre los datos obtenidos [8]. Entre los parámetros requeridos se encuentra la variación de la presión estática a lo largo de la cuerda del perfil por lo que se tomaron muestras de la misma en cuatro puntos en el centro de la zona de prueba y a 30 cm por debajo del eje del modelo. Estos cuatro puntos se ubicaron desde el borde de ataque a  $0c$ ,  $0.4c$ ,  $0.6c$  y  $1c$ . El ensayo se llevó a cabo con el micromanómetro y la toma estática obteniendo una medida cada 1 segundo, tomando como referencia la presión estática del Pitot-Prandtl de la corriente libre.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Caracterización del flujo

Las distancias ( $d$ ) donde se posicionaron los paneles para cada ensayo son de 1 m, 1,5 m y 2 m para el panel P2 y 1,5 m, 3 m y 3,5 m para el panel P4. Estas fueron determinadas en función de la relación distancia sobre diámetro ( $d/D$ ) (Tabla 2). Algunos estudios sobre el tema [6],[7] establecen que la relación  $d/D$  debe ser mayor a 10 o 15 para evitar la zona donde la turbulencia es altamente anisotrópica, además después de esta región la misma comienza a ser prácticamente homogénea y axisimétrica. Por otro lado, se ha demostrado que si la relación  $d/D$  es mayor a 50 la caída en los niveles de turbulencia se hace demasiado evidente; esto último sería útil en caso de querer laminarizar el flujo dentro del túnel. Para la configuración M2 se estableció que las distancias apropiadas serían 1,5 m para el panel P2 y 3 m para el panel P4 ya que permiten generar intensidades similares a la condición de túnel sin panel (P0) y con escalas distintas entre sí (Tabla 2).

Analizando la intensidad de turbulencia los resultados muestran una disminución de la misma conforme se aumenta la distancia del panel al borde de ataque del perfil (Figura 9), lo cual concuerda con lo estudiado por otros autores [9],[10]. Con ambos paneles se observó la misma tendencia. Así mismo se observa que a una misma distancia ( $d = 1,5$  m), el panel con tubos de mayor diámetro (P4) generó un valor de intensidad más alto aunque con mayor dispersión en los valores. En cuanto a la escala espacial integral se observó, en ambos paneles, que al aumentar la distancia del panel al borde de ataque del perfil se eleva el valor de la escala (Figura 10). Este resultado también concuerda con lo estudiado por otros autores [11]. Ubicados los paneles a una misma distancia ( $d = 1,5$  m) se observa que la influencia del diámetro de cada panel no genera un cambio considerable en el valor de la escala, en ambos casos  $\lambda \cong 30$  mm; sin embargo, se observa menor dispersión en el caso del panel con el mayor diámetro.

Ubicando los paneles en las distancias establecidas para la configuración M2, se evaluó en primer lugar la intensidad generada por cada panel en la sección central C (Figura 6). Se observa en la Figura 11 que con ambos paneles la intensidad se mantuvo aproximadamente constante a lo largo del eje central ( $I \cong 2\%$ ), aunque presentan un ligero cambio respecto de la intensidad del túnel limpio ( $I \cong 1,8\%$ ). Posteriormente, se corroboró que el valor de la intensidad se mantuviera aproximadamente uniforme en toda la sección del túnel; esto se cumplió en las configuraciones con panel (P2 y P4) donde  $I \cong 2\%$  en toda la sección. Sin embargo en la configuración sin panel (P0) se observan variaciones, en especial en las secciones cercanas a los paneles laterales donde la intensidad alcanza valores 3 veces mayores a los observados en la sección C.

Evaluando la escala espacial integral en la sección C para la configuración M2, se observa en la Tabla 2 que el valor de la escala generado por cada panel es del orden del radio de los tubos que conforman dichos paneles. En el caso del panel P2 ( $D = 50$  mm),  $\lambda \cong 29$ mm; mientras que en el caso del panel P4 ( $D = 100$  mm),  $\lambda \cong 56$ mm. En el caso del túnel limpio (P0), el flujo no tendrá la estructura que genera la presencia de los paneles por lo que la escala tendrá un comportamiento caótico; sin embargo, estará limitada por las medidas del túnel. Al igual que con

la intensidad, se analizó que el valor de la escala se mantuviera aproximadamente uniforme en toda la sección del túnel. En las configuraciones con panel (P2 y P4) se corroboró el valor de la escala en toda la sección  $\lambda \cong 29$  mm y  $\lambda \cong 56$  mm respectivamente. En cuanto a la configuración sin panel (P0) si bien se estimó el valor de  $\lambda$  en función de la media, no puede establecerse un valor de escala debido a la variedad de estructuras turbulentas que presenta.

Panel	d [m]	d/D	I [%]	$\lambda$ [mm]	$\lambda/C$
P0 - Sin Panel	-	-	1,8	370	1,48
P2 - Diámetro 50mm	1,00	20	3	22	0,088
	1,50	30	1,9	29	0,116
	2,00	40	1,4	39	0,156
P4 - Diámetro 100mm	1,50	15	3,5	32	0,128
	3,00	30	2,1	56	0,224
	3,50	35	1,6	81	0,324

Tabla 2: Parámetros de turbulencia generados con los paneles (P2 y P4)

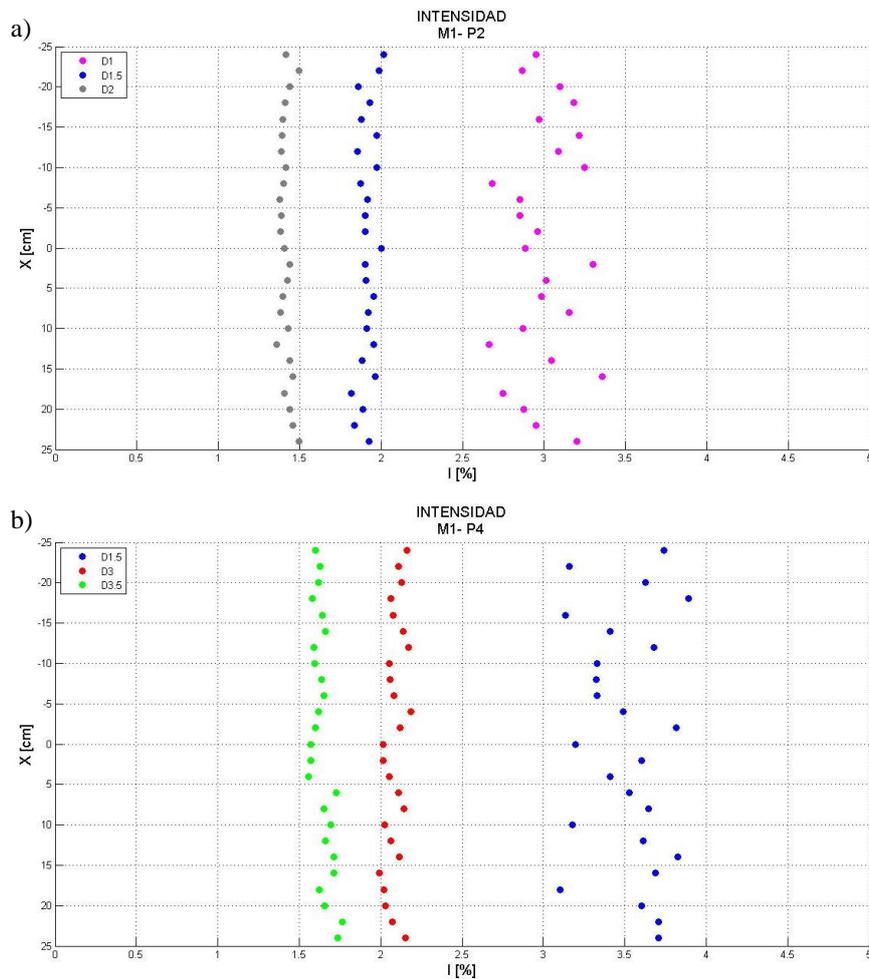


Figura 9: (a) Intensidad con panel 2 para diferentes distancias. (b) Intensidad con panel 4 para diferentes distancias.

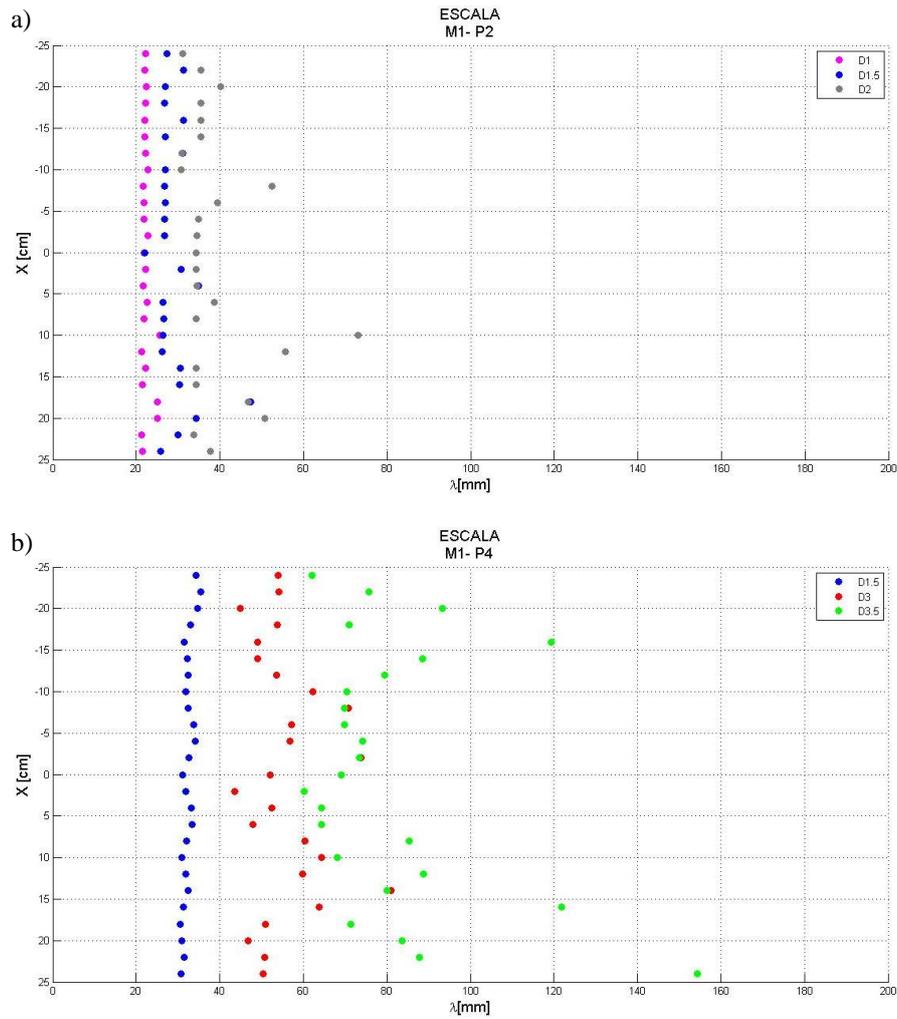


Figura 10: (a) Escala panel 2 para diferentes distancias. (b) Escala panel 4 para diferentes distancias

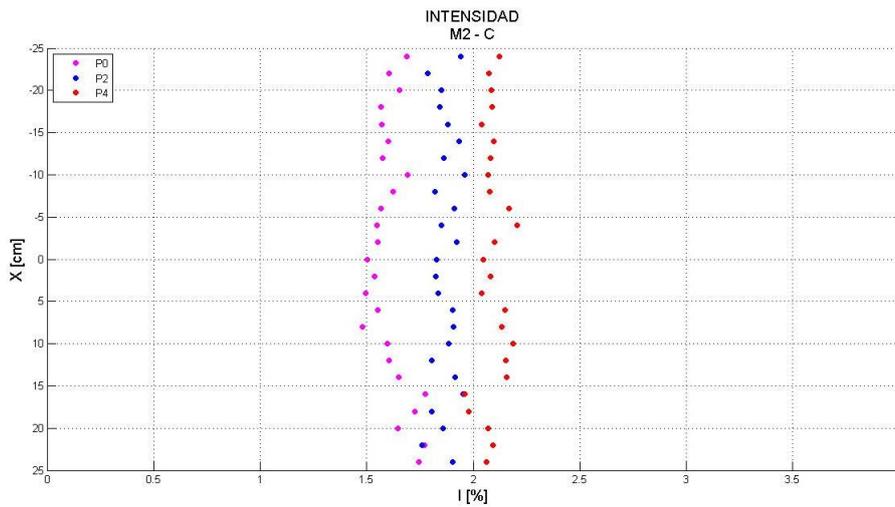


Figura 11: Intensidad generada con los paneles P2 ( $d = 1,5$  m), P4 ( $d = 3$  m) y con túnel limpio P0.

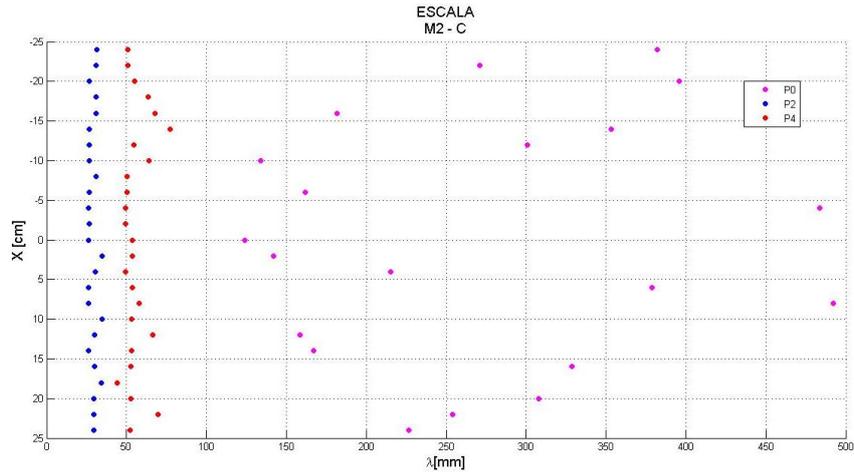


Figura 12: Escala generada con los paneles P2 ( $d = 1,5$  m), P4 ( $d = 3$  m) y con túnel limpio P0.

Finalmente se graficó el perfil de velocidades de la sección de prueba para cada caso estudiado (P0, P2 y P4). En todos los casos la velocidad media se aproxima a la medida por el tubo Pitot ( $U_m = 9$  m/s) aunque en los casos en los que se colocaron los paneles es ligeramente menor (Figura 13).

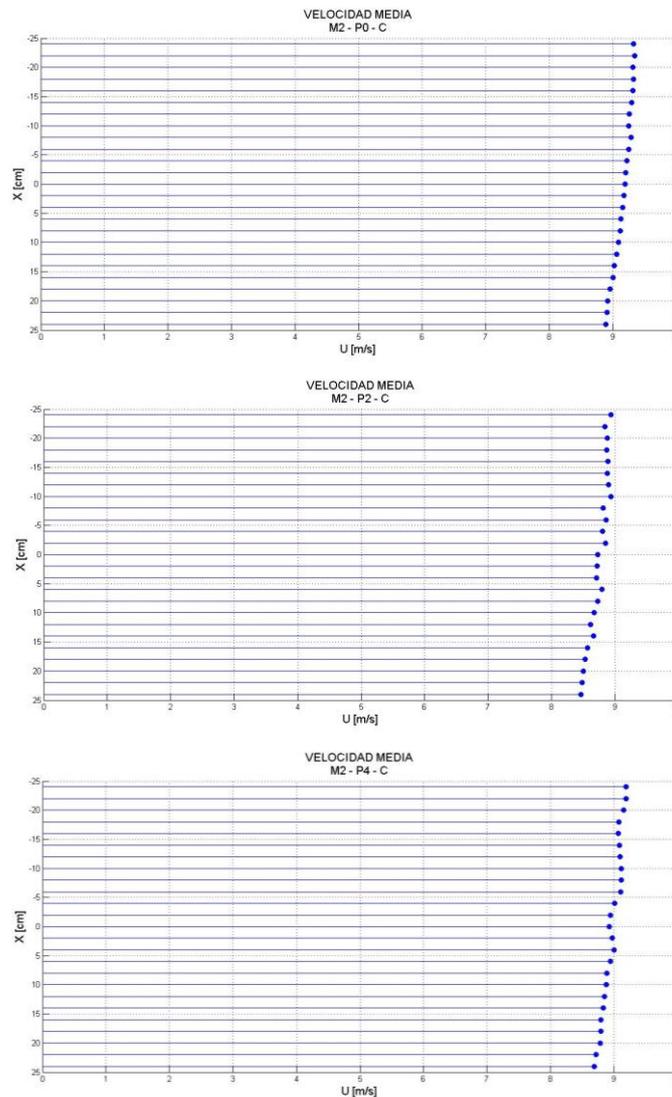


Figura 13: Perfil de Velocidades en cada caso (P0, P2 y P4)

Con el propósito de buscar picos de energía se realizó el espectro de densidad de frecuencia de la componente vertical de la velocidad sobre el punto medio de la sección de prueba, para todos los casos (P0, P2 y P4); sin embargo no se observaron cambios significativos en la señal, con lo cual no se puede establecer una relación entre el diámetro del panel y la frecuencia de los remolinos. En la Figura 14 se observa que al aumentar la escala existe mayor concentración de energía a frecuencias más bajas. Esto era de esperar debido a que para altas frecuencias en un mismo periodo de tiempo se encuentran más remolinos de menor escala y a bajas frecuencias predominan los remolinos de mayor escala. Además en la Tabla 3 se compara cuantitativamente el efecto de cada panel evaluando la energía asociada a la frecuencia correspondiente para cada escala temporal ( $\lambda_t$ ), corroborando el efecto mencionado anteriormente.

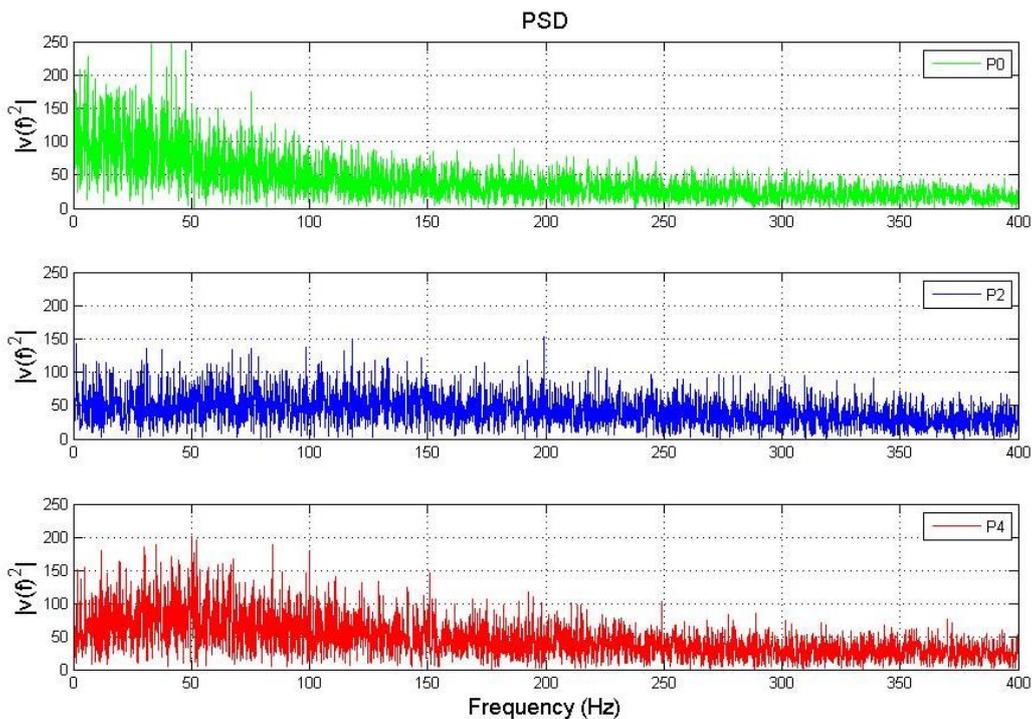


Figura 14: Espectro de Densidad de Frecuencia de la componente vertical de la velocidad (v)

Configuración	Escala Temporal [s]	Frecuencia [Hz]	$ V(f)^2 $ [ $m^2/s^2$ ]
M2P2	0,003	333,33	25,4
M2P4	0,006	166,66	34,7

Tabla 3: Energía asociada a la escala

### Efecto de la escala de turbulencia a intensidad constante

Se compararon sólo los efectos de la escala, en los casos donde se usaron los paneles debido a que en dichos casos, la intensidad se mantuvo aproximadamente constante ( $I=2\%$ ); el caso sin panel presentaba una menor intensidad ( $I=1,7\%$ ). Tanto el coeficiente de sustentación como el de resistencia y momento fueron calculados integrando numéricamente la distribución de presión media sobre el perfil.

Se observa en la Figura 15 que al aumentar la escala ( $\lambda/C = 0.12$  a  $0.22$ ), el coeficiente de sustentación máximo ( $Cl_{max}$ ) y su respectivo ángulo de ataque aumentan, así como la pendiente. A su vez, el número de Reynolds genera el mismo efecto sobre dichos parámetros aunque en menor medida. En cuanto a la entrada en pérdida del perfil, el aumento en la escala genera un retraso de la misma, siendo más notorio para  $Re = 150.000$  y  $200.000$ ; el coeficiente de sustentación correspondiente a esta condición ( $Cl_{stall}$ ) aumentó con la escala en todos los casos, por el contrario conforme aumenta el número de Reynolds, para una misma escala, el  $Cl_{stall}$  disminuye siendo más notorio su efecto a menores escalas. Como se puede ver en la Tabla 4, respecto de los resultados que obtuvieron otros autores [3],[4][12] la condición que no se pudo corroborar al aumentar la escala es el adelanto del ángulo de

pérdida. Esto puede deberse a que, si bien se buscó mantener la intensidad constante, el panel P4 cuenta con una ligero aumento de intensidad respecto a la intensidad con el panel P2. De estudios previos[3][4] se deduce que la intensidad tiene una gran influencia sobre la capa límite, ya que a mayor intensidad hay mayor energía que permite a la capa límite soportar en mayor medida el gradiente de presión adverso retrasando el desprendimiento.

El coeficiente de resistencia ( $C_d$ ) analizado corresponde a la contribución por presión; al medir sólo presiones, el coeficiente de resistencia por fricción no pudo ser determinado experimentalmente. Se observa en la Figura 16 que la resistencia aumenta ligeramente con la escala aunque en mayor medida cuando entra en pérdida el perfil. En cuanto al coeficiente de momento tomado al cuarto de cuerda ( $C_{m_{c/4}}$ ) también presenta un incremento con el aumento de escala, especialmente a ángulos de ataque correspondientes a la zona de variación lineal del coeficiente de sustentación y durante la entrada en pérdida del perfil (Figura 17).

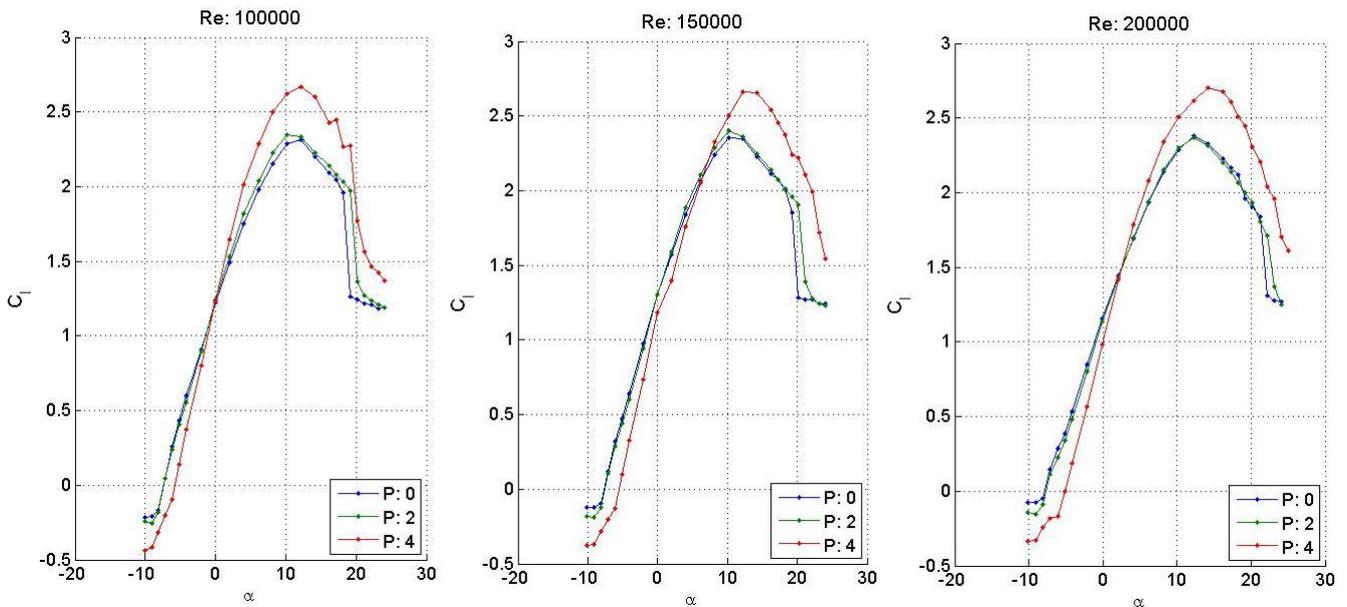


Figura 15: Comparación de la curva  $C_l$  vs.  $\alpha$ . (a)  $Re = 100.000$ , (b)  $Re = 150.000$  y (c)  $Re = 200.000$ .

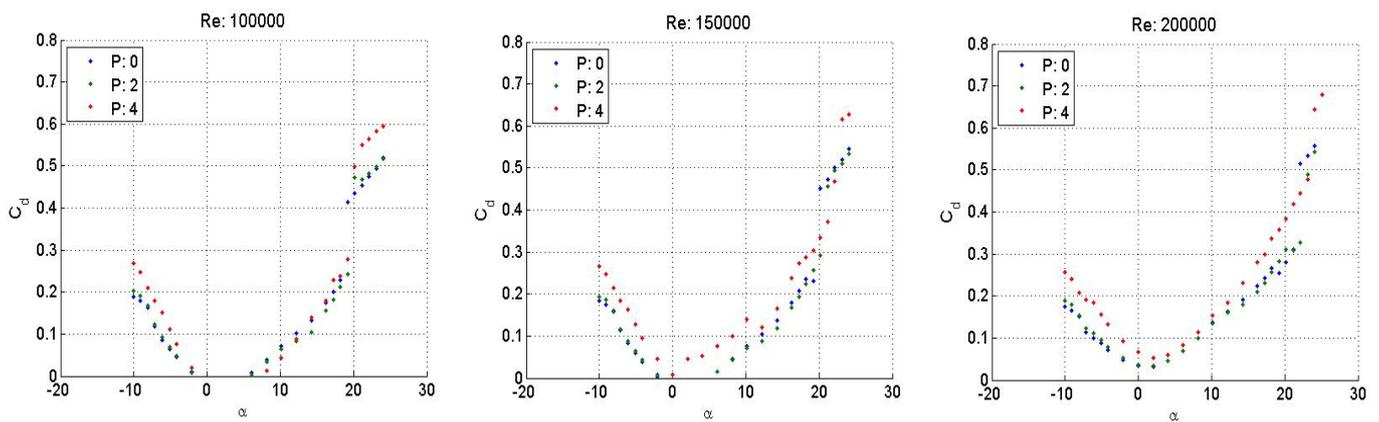


Figura 16: Comparación de la curva  $C_d$  vs.  $\alpha$ . (a)  $Re = 100.000$ , (b)  $Re = 150.000$  y (c)  $Re = 200.000$ .

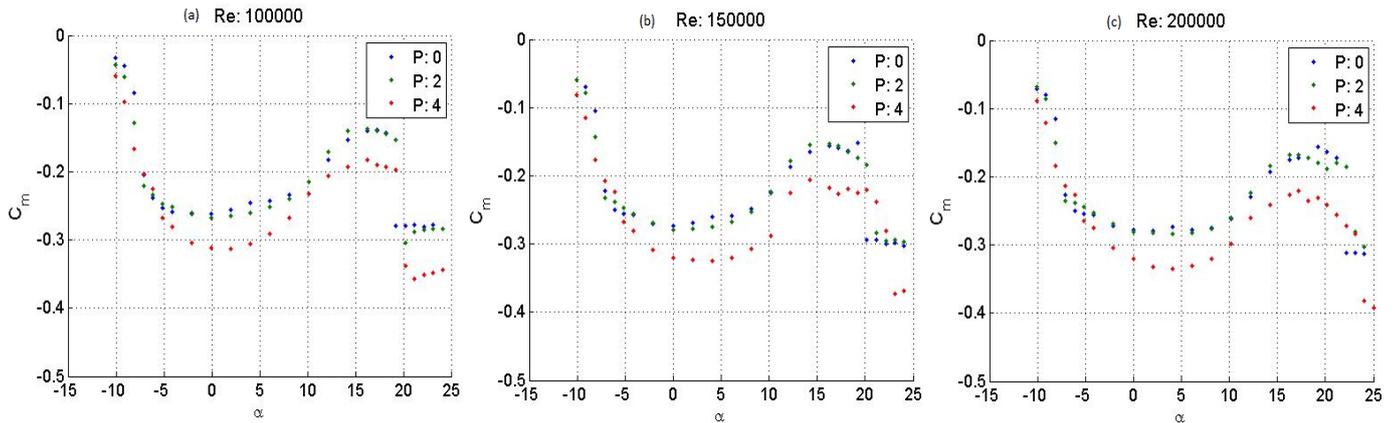


Figura 17: Comparación de la curva  $C_{m_{c/4}}$  vs.  $\alpha$ . (a)  $Re = 100.000$ , (b)  $Re = 150.000$  y (c)  $Re = 200.000$ .

Característica		Re		
		100 000	150 000	200 000
Aumento en la escala	Adelanto de pérdida	X	X	X
	Aumento $Cl_{m\acute{a}x}$	O	O	O
	Mayor pendiente	O	O	O

Tabla 4: Parámetros variables con la escala (medición con presiones).

Evaluando la distribución de presiones (Figura 18) para un ángulo de ataque previo a la pérdida, se puede observar un pico de succión cerca del borde de ataque. Existe un aumento en la magnitud de dicho pico cuando aumenta la escala, además de disminuir en longitud y acercarse al borde de ataque. Algunos autores [12] sugieren que esta reducción conlleva a un mayor valor de sustentación, lo cual se verifica en la Figura 15.

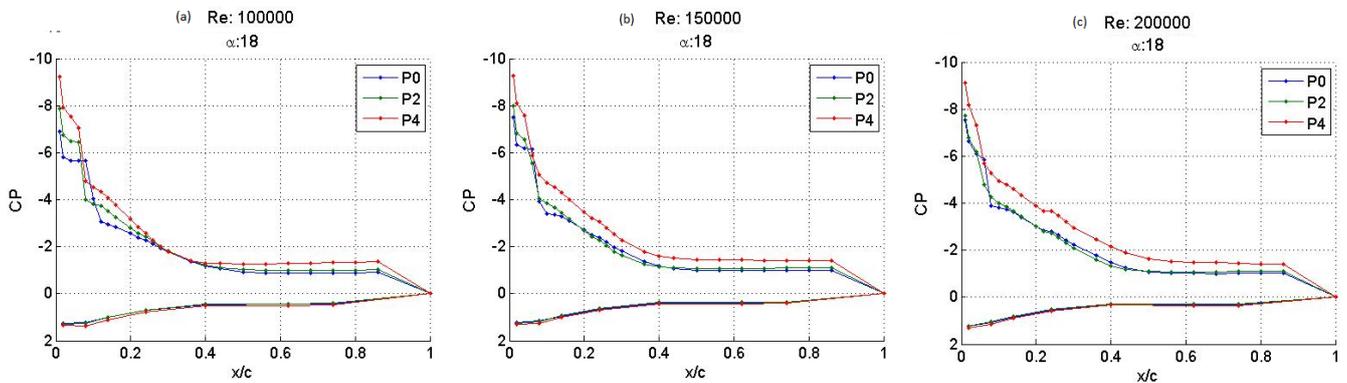


Figura 18: Distribución de presión para  $\alpha = 18^\circ$ . (a)  $Re = 100.000$ , (b)  $Re = 150.000$  y (c)  $Re = 200.000$ .

Para los casos en los que se utilizaron paneles se identificaron en el borde de ataque picos de succión después de la entrada en pérdida, que aumentan ligeramente a mayores Reynolds (Figura 19). La aparición de estos picos puede estar relacionada con la estructura turbulenta generada por los paneles, que permite una mejor interacción con el flujo alrededor del perfil, a diferencia del caso sin panel donde no es posible identificar una escala predominante.

Se compararon las curvas entre los casos con panel y sin panel, teniendo en cuenta los resultados de variar la intensidad a escala constante [2][3][4][12] y que el túnel sin panel cuenta con la menor intensidad ( $I \approx 1.7\%$ ) y la mayor escala media ( $\lambda C \approx 1.5$ ). Se corroboró que la intensidad tiene más influencia sobre la entrada en pérdida que la escala, cabe destacar que en este caso las escalas utilizadas no son lo suficientemente chicas como para interactuar directamente con la capa límite, disminuyendo su influencia. Además se observó que la pendiente es

menor para el caso sin panel, un comportamiento opuesto al esperado tanto por la intensidad como por la escala. Este resultado puede estar relacionado con los picos de succión en el borde de ataque (Figura 19), que podrían modificar la curvatura que ve el flujo al bañar al perfil, generando una mayor pendiente en estos casos [4].

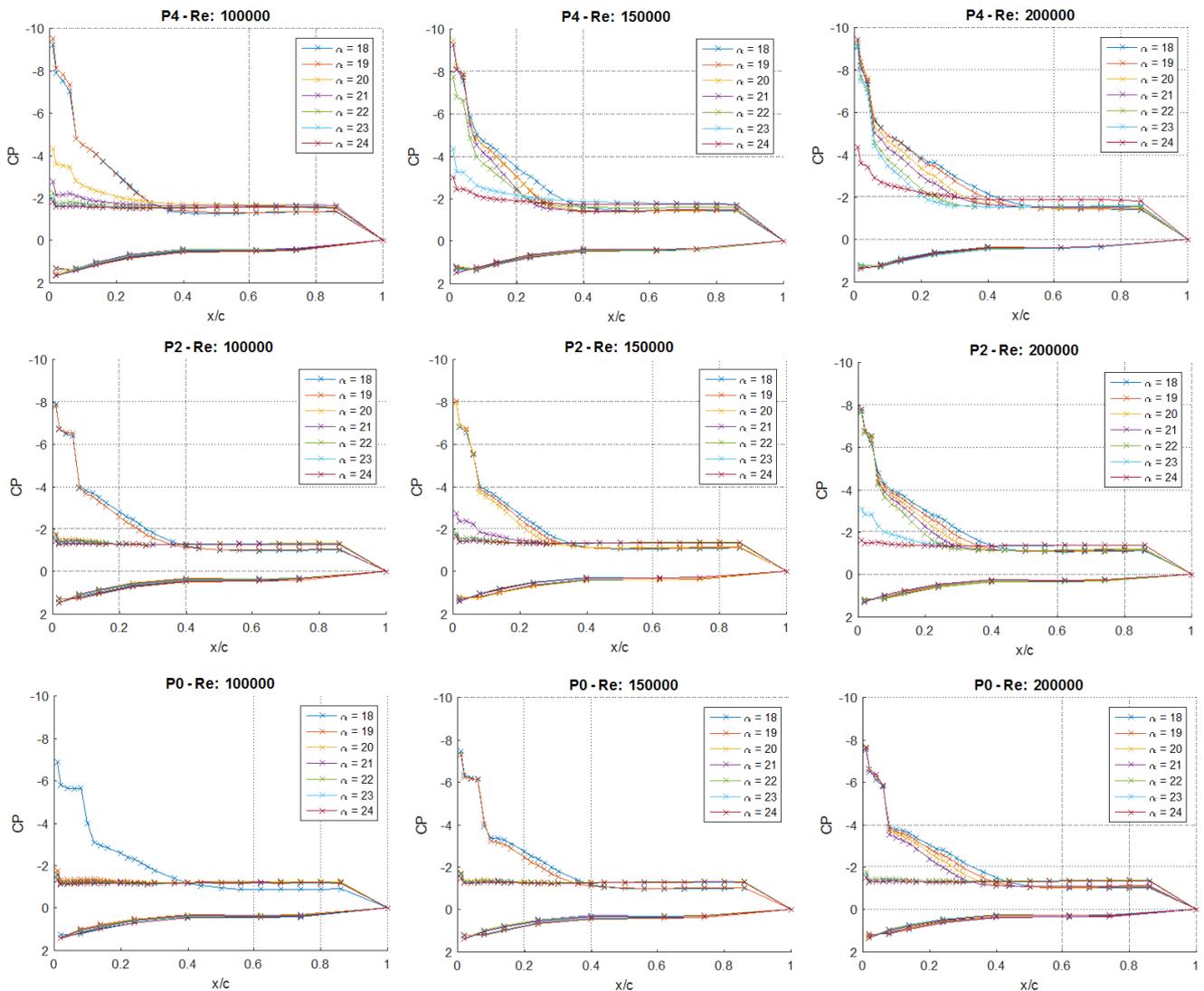


Figura 19: Comparación de la distribución de presión. (a)  $Re = 100.000$ , (b)  $Re = 150.000$  y (c)  $Re = 200.000$ .

## CONCLUSIONES

Mediante el diseño e implementación de paneles se lograron modificar las características turbulentas (intensidad y escala) del túnel de viento como fue planteado en el objetivo de este trabajo. Así mismo, se analizó la influencia que tenían la distancia del panel al borde de ataque y el diámetro de las celdas que conforman al panel; el permitir la movilidad de los paneles dentro del túnel hizo posible encontrar la posición a la cual se modificara la escala manteniendo la intensidad constante y una vez encontrada dicha posición el parámetro que determinó la escala fue el diámetro de las celdas.

Mediante la caracterización de la sección del túnel, se verificó que los valores de escala e intensidad se mantuvieran uniformes en toda la sección; así mismo, se obtuvo el perfil de velocidades, el cual se corresponde aproximadamente con un perfil de flujo turbulento. Se observó en la zona inferior del túnel una disminución de velocidad la cual se debe a la configuración del túnel de viento utilizado. Como era de esperarse, al acercarse a las paredes del túnel el flujo se veía afectado por la presencia de la capa límite.

Además, se estudiaron las cargas aerodinámicas sobre el perfil al disminuir la escala de  $\lambda/c \cong 0,116$  a  $0,224$  manteniendo la intensidad aproximadamente constante  $I \cong 2\%$ . Los datos obtenidos muestran una concordancia

con estudios realizados anteriormente por otros autores en cuanto al coeficiente de sustentación máxima y la pendiente, no así con el ángulo de pérdida.

Finalmente, para relacionar los cambios observados sobre los coeficientes aerodinámicos con el flujo incidente, se analizó la distribución de presión sobre el perfil. Se identificaron cambios en los picos de succión relacionados al cambio de escala y en general a la presencia de flujo turbulento. Para entender mejor la influencia de la escala se deberán ensayar con escalas que estén en el orden de la capa límite para poder determinar así la influencia de pequeñas escalas turbulentas interactuando directamente con la capa límite. Además, mediante anemometría de hilo caliente se podrían identificar cambios en la capa límite del perfil con los cambios de la turbulencia de la corriente libre.

## REFERENCIAS

- [1] D. W. Kindelspire, “The effects of freestream turbulence on airfoil boundary layer behavior at low Reynolds numbers”, M.S. thesis, Naval Postgraduate School, Southeast Missouri State Univ., Monterrey, California, 1988.
- [2] T. C. Yap, M. Abdullah, Z. Husain, Z. Mohd Ripin & R. Ahmad, “ The effect of turbulence intensity on the aerodynamic performance of airfoils”. *4th International Conference on Mechanical Engineering*, Dhaka, Bangladesh, 2001, pp. 31-36.
- [3] N. Cao, “Effects of turbulence intensity and integral length scale on an asymmetric airfoil at low Reynolds numbers”, M.A.Sc. thesis, Faculty of graduate studies, Windsor Univ., Windsor, Canada, 2010.
- [4] S. Ravi, et al., “Influence of Large-Scale Freestream Turbulence on the Performance of a Thin Airfoil”. *AIAA J.*, vol. 50, no.11, pp. 2448-2459, Nov., 2012.
- [5] R.I. Loehrke, H. M. Nagib, “Experiments on Management of Free-Stream Turbulence”, Mech. Aero. Eng. Dept., Illinois Tech. Inst., Chicago, IL, AGARD Report 598, 1972.
- [6] J. O.Hinze, “*Turbulence - An Introduction to Its Mechanism and Theory*,” 2nd ed., New York, McGraw-Hill College, 1975.
- [7] R.I. Loehrke, H. M. Nagib, “Control of Free-Stream Turbulence by Means of Honeycombs: A Balance Between Suppression and Generation”. *J. of Fluids Eng.*, vol. 98, no. 3, pp. 342 – 351, Sep., 1976.
- [8] J. Barlow, W. Rae & A. Pope, " Boundary Corrections I: Basics and Two-Dimensional Cases," in *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, 3rd ed. New York, John Wiley & Sons INC., 1999, pp. 350-361.
- [9] G. A. Gaviria M., G.A. Patiño y R. Martínez , “Dispositivos De Reducción De Turbulencia En Túneles De Viento,” *Rev. Colomb. de Física*, vol. 42, no. 3, Apr., 2011.
- [10] Rui Liu, David S-K Ting, , Gary W Rankin, “On the generation of turbulence with a perforated plate,” *Exp. Therm. and Fluid Sc.*, vol. 28, pp. 307-316, Mar., 2014.
- [11] F. Murzyn, M. BÉlorgey, “ Experimental investigation of the grid-generated turbulence features in a free surface flow,” *Exp. Therm. and Fluid Sc.*, vol. 29, pp.925-935, Sep., 2005.
- [12] M. S. Istvan, J. Kurelek, and S. V. Yarusevych, “Effects of free-stream turbulence intensity on laminar separation bubbles”, *46th AIAA Fluid Dynamics Conference*, Washington, D.C., 2016, doi: [[10.2514/6.2016-3946](https://doi.org/10.2514/6.2016-3946) ].