

# Influencia de la turbulencia en placa plana oscilante a bajo Reynolds

Santiago Algozino<sup>1,2</sup>, Juan Sebastián Delnero<sup>1,2</sup> y Julio Marañón Di Leo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>CTA/UIDET-LaCLyFA, Departamento Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup>CONICET. Avda. Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 01/02/2019

Fecha de aceptación del manuscrito: 28/05/2019

Fecha de publicación: 15/07/2019

**Resumen**— Con los nuevos desarrollos de micro-vehículos aéreos, se han realizado, recientemente, innumerables estudios de los efectos no estacionarios sobre las cargas aerodinámicas en bajo número de Reynolds, con flujo laminar incidente, pero muy poca información se puede encontrar de este fenómeno ante condiciones turbulentas, como en las que operan estos vehículos. Si nos concentramos en el movimiento de cabeceo, su efecto principal es el de generar vórtices que incrementan la sustentación generada por un perfil o ala. En este contexto, se estudió la influencia de la intensidad de turbulencia en las cargas aerodinámicas de una placa plana, cuando esta tiene un movimiento de cabeceo puro oscilatorio a tres números de Reynolds distintos y tres frecuencias reducidas mediante mediciones con balanza aerodinámica para las fuerzas y además se realizó una caracterización de la estela mediante un rack de presiones. Al analizar la fuerza de sustentación, se encuentran una mayor histéresis en la zona de ángulos mayores al de pérdida al aumentar la frecuencia reducida, pero no así al aumentar la intensidad de turbulencia. Por otro lado, en la caracterización de la estela, se identificaron estructuras coherentes, para todos los casos y una importante influencia de la turbulencia en dichos patrones, a partir de correlaciones cruzadas y mapas de wavelet.

**Palabras clave**—Turbulencia, Placa Plana, Cargas Aerodinámicas, Cabeceo, MAV.

**Abstract**— In the recent years, with the new developments of micro aerial vehicles, uncountable researches were made about the non-stationary effects on the aerodynamic loads at low Reynolds numbers, with laminar flow. However, it is hard to find information about the turbulence effect on these conditions, where those vehicles operate. Focusing in the pitching movement, the main effect is the generation of leading and trailing edge vortices which increase the lift generated by the airfoil. On this scenario, the influence of the turbulence was studied on the aerodynamics loads of a pitching flat plate at three Reynolds numbers and reduced frequencies with aerodynamic balance. Also, a characterization of the wake with a pressure rack was performed. The analysis of the lift shows an increment of the hysteresis in the post-stall zone, when the reduced frequency is increased, however no changes were found with the turbulence effect. On the other hand, in the wake measurements, coherent structures were identified in all studied cases and an important effect of the turbulence, analyzing the patterns using cross-correlations and wavelet analysis.

**Keywords**— Turbulence, Flat Plate, Aerodynamics Loads, Pitching, MAV.

## INTRODUCCIÓN

En la última década ha sido de gran interés el desarrollo de los micro vehículos aéreos (MAV, por sus siglas en inglés), ya que dichas aeronaves obtienen todas las ventajas de sistemas de vuelo mediante aleteo respecto a los sistemas convencionales de generación de sustentación de ala fija o las rotatorias de propulsión (hélices) (Mueller et al., 2010). Un ejemplo de ello es la posibilidad de generar sustentación sin la necesidad de avanzar. En el aleteo, la generación de sustentación y empuje se producen de forma simultánea (Jadhav y Massey, 2007), y las inestabilidades aerodinámicas propias de este tipo de vuelos permiten una

alta maniobrabilidad en ambientes desfavorables, necesitando altos valores de eficiencia en empuje y propulsión.

Los MAV, desarrollados o en desarrollo, hoy en día provienen de la observación del vuelo de las aves en la naturaleza (Brown, 1948) y (Shyy et al., 2010) revelando que los pájaros no solo usan el clásico movimiento combinado de cabeceo y alabeo (o “flapping”) para el aleteo, sino que también incorporan un movimiento de deslizamiento (“gliding”) en dirección de la velocidad de la corriente libre incidente. Al incorporar esta mecánica para la generación de sustentación y empuje, se logra un gran potencial para que el vehículo pueda alcanzar zonas inhóspitas o de acceso complicado para el monitoreo ambiental o seguridad.

En particular, se puede describir el aleteo de las aves como una superposición de tres movimientos rotativos: cabeceo, alabeo y deslizamiento, donde cada movimiento tiene una función particular a la hora de la generación de fuerza de sustentación. Dependiendo la fase del vuelo la superposición de estos movimientos puede variar, y además, dependerá del tamaño del ave o insecto (Ellington, 1984). Por ejemplo, el alabeo es la principal fuente de generación de diferencias de presiones para la generación de fuerza de sustentación, en la fase de descenso del ala, pero se debe acoplar con un movimiento de cabeceo en la etapa de ascenso para minimizar el efecto de fuerza contraria a la sustentación en esta fase (Shyy *et al.*, 2010). El movimiento de cabeceo, además, es la principal fuente de generación de vórtices de borde de ataque y de fuga, que las alas batientes son capaces de aprovechar para poder generar sustentación adicional capturando dichos vórtices y produciendo una mayor recirculación (Shyy *et al.*, 2010).

Desde la década de los '70 que se estudia la pérdida dinámica como un efecto adverso en la separación de flujo, dado que genera cargas oscilantes sobre las palas de rotores de helicópteros (McCroskey, 1981). Por otro lado, recientemente se estudian los movimientos oscilatorios de cabeceo, para aprovechar los desprendimientos vorticosos, más conocidos como vórtice de borde de ataque (LEV) y vórtice de borde de fuga (TEV) para generar sustentación adicional, y la posibilidad de generar empuje, en vez de resistencia (Ol y Babinsky, 2016). Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados, se han realizado bajo condiciones de flujo laminar, mientras que los MAV están diseñados para volar a bajas altitudes, lo que conlleva a estar inmersos en la baja capa límite atmosférica, donde las turbulencias son importantes. Es sabido que la turbulencia genera modificaciones en la capa límite de los perfiles aerodinámicos (Aramburu *et al.*, 2016) pero poca información se encuentra sobre la influencia ante movimientos periódicos, en bajo número de Reynolds.

Dado este contexto, el objetivo de este trabajo es realizar el análisis de la influencia de la turbulencia incidente mediante ensayos en túnel de viento, sobre una placa plana con un movimiento oscilatorio puro en números de Reynolds menores a 100.000, a distintas frecuencias reducidas. Se estudiará la evolución de la fuerza aerodinámica de sustentación y se realizarán mediciones sobre la estela con rack de presiones para la caracterización de la misma.

## METODOLOGÍA

Todos los ensayos fueron realizados en el TV4 de la UIDET-LaCLyFA, perteneciente a la Universidad Nacional de La Plata. Dicho túnel de viento es de circuito abierto con una contracción en la entrada de 9:1. La sección de prueba es cuadrada, con 0,4 m de lado y una velocidad máxima de operación es de 30 m/s. Para poder realizar el estudio sobre la influencia de la turbulencia se repitieron los ensayos a distintas frecuencias reducidas ( $k$ ) y tres números de Reynolds a dos intensidades turbulentas incidentes diferentes: 0,5% y 1%. En la Figura 1 se pueden observar los perfiles de turbulencia para dos velocidades medias diferentes. Más información sobre los mismos y la metodología de medición se puede encontrar en Algozino *et al.*, 2018.

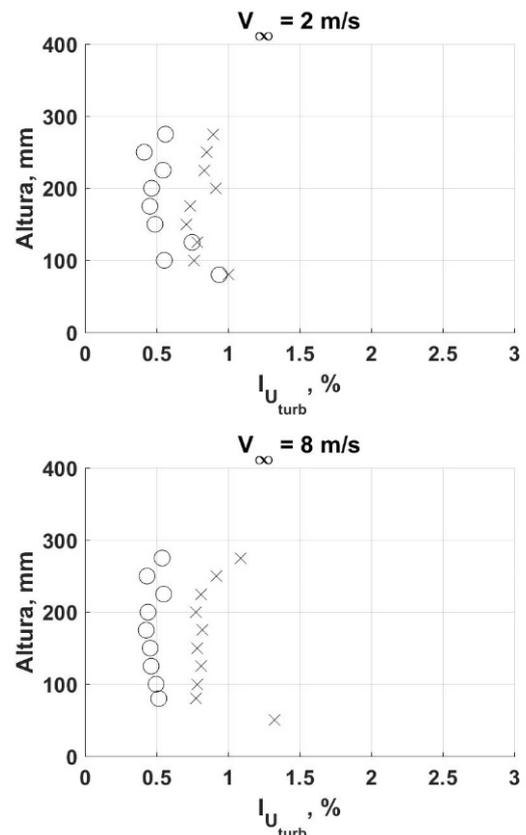


Fig. 1: Perfiles de intensidad de turbulencia utilizados para 2 m/s y 8 m/s.

El montaje en túnel de viento se realizó utilizando un pórtico exterior, donde se encuentra un motor paso a paso que, mediante un sistema de correa sincrónica, mueve un acople que vincula la balanza aerodinámica con un rodamiento alojado en el pórtico. La balanza aerodinámica queda vinculada rígidamente con el ala mediante un acople plástico, donde se encuentran montados el acelerómetro y el giróscopo, ver Figura 2. El sensor hall queda vinculado mediante un acople flexible en la parte posterior del pórtico, gracias a una varilla que atraviesa el rodamiento. De esta forma, el ala queda emplazada de pared a pared, con 1 mm de despeje entre el modelo y las paredes del túnel de viento. El eje de rotación se mantuvo fijo a la mitad de la cuerda. El ala es una placa plana de aluminio de 3 mm de espesor, y una cuerda de 100 mm, teniendo así una relación de espesor/cuerda del 3%. Las velocidades incidentes seleccionadas para el ensayo son: 4, 8 y 10 m/s, o analizándolo en número de Reynolds basado en la cuerda, se obtienen valores de 23000, 46000 y 57000. La turbulencia del túnel de viento fue modificada utilizando una grilla luego de la contracción inicial, la cual posee una forma cuadrada, con un espaciado de 15 mm y laterales de un tamaño de 2 a 3 mm. De esta forma se logra incrementar la intensidad de turbulencia.

El movimiento utilizado es un movimiento de rampa ida y vuelta, con los cambios de velocidad suavizados mediante una función desarrollada por Eldredge *et al.*, 2009. Dicho movimiento fue realizado a distintas frecuencias, obteniendo finalmente una frecuencia reducida ( $k$ ) de: 0,015; 0,03 y 0,06, donde la frecuencia reducida fue calculada con su forma clásica ( $k = \pi f c / U$ ), siendo  $c$  la cuerda en metros,  $U$  la velocidad de la corriente libre en metros por segundo y  $f$  la frecuencia del movimiento en Hz. El número de Strouhal para estas condiciones de ensayos es, respectivamente:

0.0047, 0.0095 y 0.019. La forma del movimiento realizado se puede observar en la Figura 3 en función del periodo del movimiento.

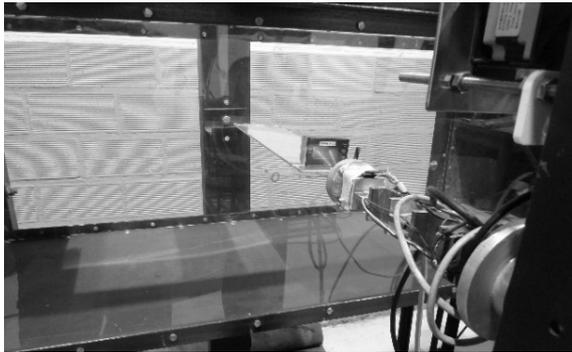


Fig. 2: Montaje en túnel de viento.

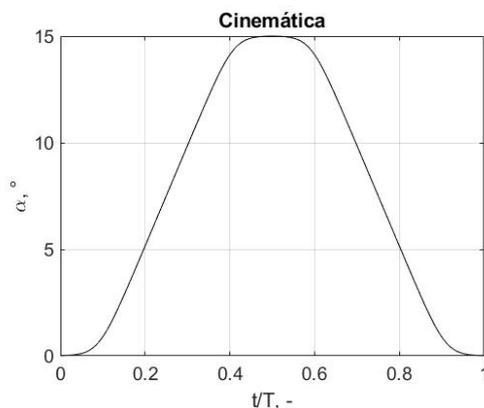


Fig. 3: Cinemática del ala en función del tiempo adimensional.

Las mediciones de carga aerodinámica fueron realizadas con una balanza diseñada en el laboratorio, la cual cuenta con dos puentes de Wheatstone completo para la medición de las dos componentes de fuerza, normal y axial. El ángulo de ataque fue medido mediante un sensor hall de  $360^\circ$  (SEN0221). Todas las señales analógicas fueron medidas con instrumental National Instruments, con su chasis SCXI-1000, el conversor A/D SXCI-1600, y utilizando el módulo acondicionador de señales SCXI-1520. Para la adquisición de las cargas en movimiento oscilatorio se configuró un filtro pasa bajo en 10 Hz, pero además en el procesamiento de las señales se filtró nuevamente las señales con un filtro pasa-bajo Chebyshev tipo II, con una frecuencia de paso de 9 Hz y una atenuación de 20 dB, dado que la frecuencia natural del sistema (ala-balanza) es de 10 Hz, lo cual inducía oscilaciones en las mediciones de las fuerzas producto de las vibraciones mecánicas.

Dada la metodología elegida para las mediciones de cargas, es necesario la medición de las cargas inerciales generadas por el modelo durante el movimiento, y de esta forma descontarla de las mediciones, para obtener así las fuerzas aerodinámicas. Para poder medir únicamente los esfuerzos inerciales, se construyó un elemento equivalente con misma masa, inercia, y ubicación del centro de gravedad, pero minimizando las fuerzas aerodinámicas. Resultados de la metodología aplicada se pueden encontrar en Algozino et al., 2018.

La secuencia de medición consistió en medir durante 1 segundo en forma estacionaria a un ángulo nulo, luego realizar 11 ciclos del movimiento propuesto anteriormente.

Esta secuencia fue repetida cinco veces y obtenidos los valores medios de todos los ciclos. Comparaciones entre las mediciones con los dos niveles de turbulencia se realizaron para la fuerza aerodinámica en función del tiempo y del ángulo de ataque para poder comparar y obtener conclusiones.

Por otro lado, se realizaron mediciones de la presión en la estela del perfil, a media y una cuerda de distancia aguas abajo, mediante un rack de presiones diseñado específicamente con 31 tomas de presión distribuidas en altura, para caracterizar el campo fluidodinámico en la misma. Dichas mediciones fueron realizadas con dos scanner de presiones Scanivalve DSA 3217 a 500 Hz, durante la misma cantidad de ciclos ensayadas con las cargas. Análisis de valores medios, correlaciones cruzadas y mapas de wavelets fueron realizados para caracterizar la estela y obtener información sobre ella y su relación con las cargas aerodinámicas. Las correlaciones cruzadas fueron realizadas entre los distintos sensores de presión en una misma estación para analizar el tamaño de la estela, y además, entre un sensor en una estación y todos los sensores en la ubicación aguas abajo para cuantificar el movimiento del flujo. El análisis de transformación de wavelet (Farge 1990) fue realizado utilizando la segunda derivada de la distribución gaussiana (sombrero mexicano), detectando así los máximos y mínimos en la señal, lo cual está directamente relacionado con estructuras coherentes (vórtices) (Schneider y Vasilyev, 2010).

## RESULTADOS

### Cargas aerodinámicas

En las siguientes figuras se muestran los resultados medios de los distintos casos analizados, en función del tiempo, adimensionalizado con el periodo del movimiento ( $T$ ), y en función del ángulo de ataque ( $\alpha$ ), comparando dichos resultados con los encontrados para la condición de ángulo de ataque estático (Algozino et al., 2018).

Para los gráficos del coeficiente de sustentación ( $C_l$ ) en función del tiempo adimensional con respecto al periodo del movimiento (Figuras 4 y 5), se debe tener presente que, tomando el tiempo adimensional como referencia, el ángulo incrementa a partir de 0.1 hasta 0.4 con velocidad constante, donde comienza la zona de desaceleración y ángulo constante en su valor máximo ( $15^\circ$ ). Luego comienza a acelerarse nuevamente el movimiento, hasta llegar a velocidad constante en 0.6, continuando así hasta 0.9 donde comienza el proceso de desaceleración para llegar a los  $0^\circ$  de ángulo de ataque en el valor de 1 del tiempo adimensional. Ver Figura 3. Además, se agrega con una línea negra punteada, el valor del coeficiente aerodinámico en condición estática para poder tener una comparación directa. Dicho valor fue obtenido mediante una interpolación en función del ángulo de ataque que posee el ala en cada valor temporal y el valor del coeficiente ante condiciones estáticas.

Al observar los resultados de la Figura 4 se puede notar como al aumentar la frecuencia reducida, se produce un retraso en la entrada en pérdida del perfil, logrando mayores valores de sustentación, aunque el incremento entre la frecuencia reducida 0.015 y 0.03 no es tan marcada como respecto a la frecuencia reducida de 0.06. Este fenómeno se

produce con ambas intensidades de turbulencia. Al comparar los resultados de ambas intensidades de turbulencia, Figura 5, no se presentan diferencias importantes en los resultados dinámicos, como si fue encontrado en resultados anteriores ante un efecto no estacionario no periódico y en los ensayos estáticos (Algozino *et al.*, 2018).

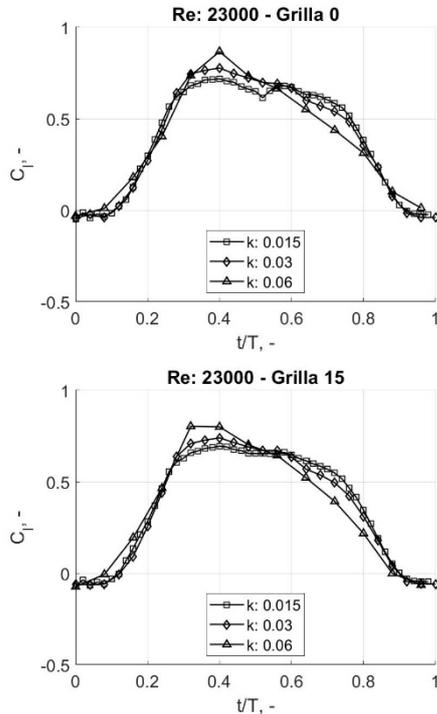


Fig. 4: Comparación de coeficiente de sustentación en función del tiempo adimensional, para la condición de mínima y máxima turbulencia ensayada.

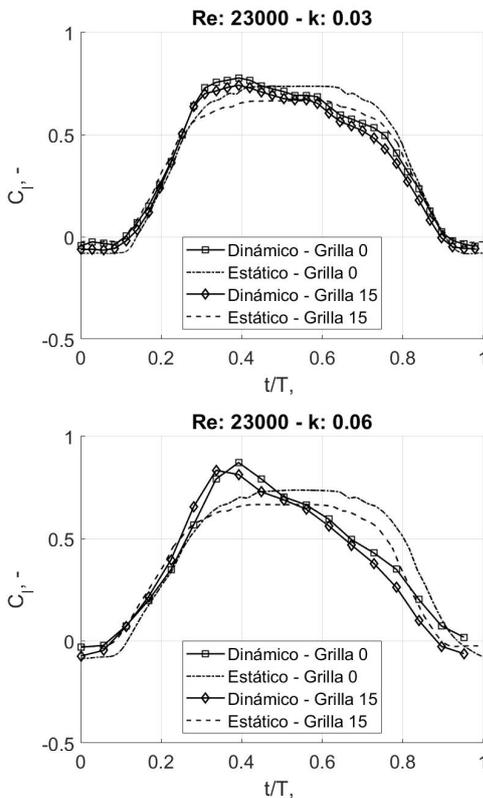


Fig. 5: Comparación del coeficiente de sustentación en función del tiempo adimensional, para distintas grillas turbulentas. Reynolds 23000 y  $k = 0,03$  y  $0,06$ .

Por otro lado, se analizó la evolución de la carga aerodinámica en función del ángulo de ataque, para poder cuantificar el efecto no estacionario, en comparación con la curva de la sustentación en condición estacionaria. Los resultados para el caso de análisis de Reynolds ( $Re$ ) 23000, se pueden observar en la Figura 6. Allí se puede comparar para cada frecuencia reducida el efecto de la turbulencia de forma directa, observándose sutiles diferencias en los valores máximos de coeficiente de sustentación, aunque dichas diferencias están comprendidas dentro del error de medición ( $2\text{ gr} \approx 0,05$  en  $C_l$  para  $Re = 23000$ ). El efecto esperado del retardo en la entrada en pérdida, generando una histéresis en el movimiento se puede observar al comparar los resultados dinámicos respecto al estático. Esta histéresis trae un aumento del  $C_l$  en el movimiento ascendente (incremento del ángulo de ataque), pero a su vez, disminuye la fuerza de sustentación en el movimiento descendente, siempre en comparación a la condición estática. Además, se puede destacar como la histéresis en la zona descendente (zona inferior) es más prolongada, hasta valores inferiores del ángulo de ataque. Al aumentar el número de Reynolds se encontraron similares resultados, es por ello que no son mostradas las gráficas.

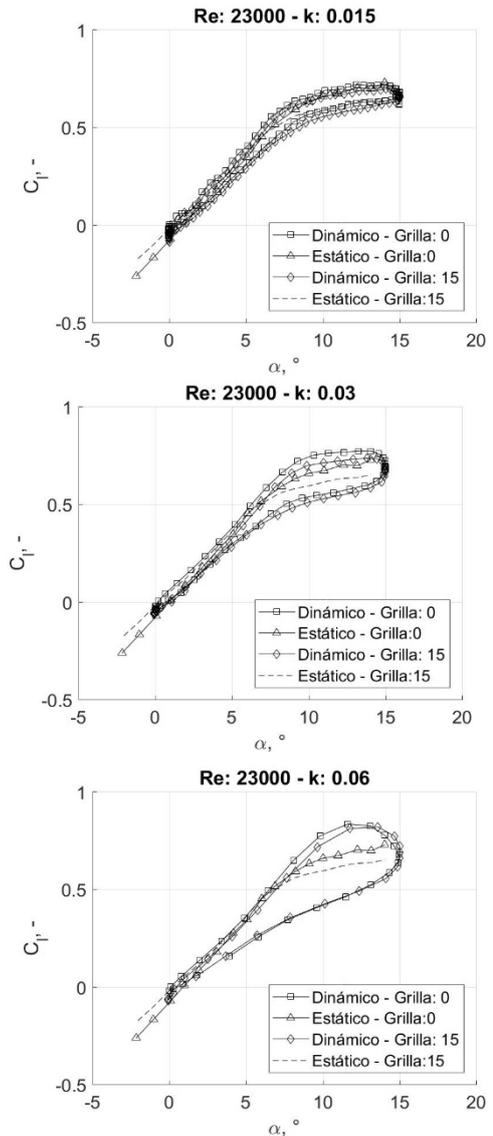


Fig. 6: Comparación del coeficiente de sustentación con respecto al ángulo de ataque para distintas frecuencias reducidas y distintas turbulencias.  $Re = 23000$ .

Al observar la comparación entre el  $C_l$  vs  $\alpha$  para las distintas frecuencias reducidas (Figura 7), se puede observar de forma notoria el efecto del retardo en la entrada en pérdida y el aumento en la histéresis al incrementar la frecuencia reducida. El incremento de la histéresis se intensifica en ángulos de ataque mayores al ángulo de pérdida estático ( $7^\circ$ ), como es de esperar en perfiles a bajos números de Reynolds.

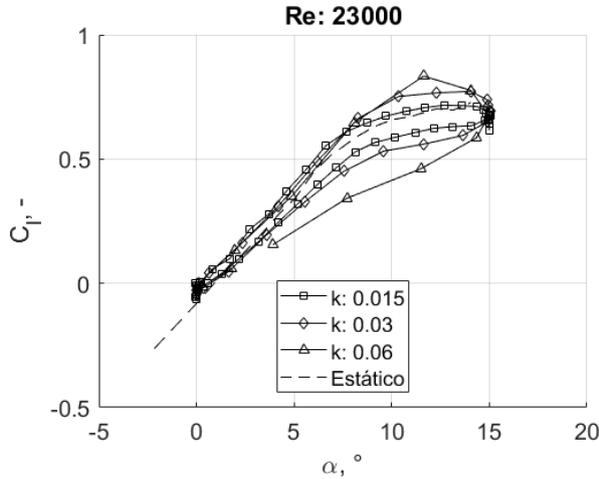


Fig. 7: Comparación del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque para el caso de mínima intensidad de turbulencia.  $Re = 23000$ .

**Presiones en la estela**

En primera instancia, se realizó la correlación cruzada entre las señales de las mediciones correspondientes a una distancia de media cuerda aguas abajo considerando la señal de referencia a la señal del sensor localizado a la altura del eje de rotación del ala ( $y/c = 0$ ). En las Figuras 8 a 11 se puede observar en el eje de las abscisas, el desplazamiento de las señales, respecto a la señal de referencia, en tiempo adimensionalizado con el periodo del movimiento ( $t/T$ ); en el eje de las ordenadas, la ubicación de las tomas de presión, adimensionalizado con la cuerda, y en escala de grises, el valor del coeficiente de correlación, siendo su valor máximo de 1 correspondiente con la correlación de dos señales idénticas y -1 para señales idénticamente opuestas. Los contornos fueron coloreados con un paso de 0.2 en el coeficiente de correlación, y los valores entre -0.2 y 0.2 fueron unificados a un único color. Como referencia, se muestra con una línea punteada el valor correspondiente a  $\pm 0.25C$  de ubicación de los sensores, y la ubicación del eje de rotación, para la determinación del tamaño de los vórtices y su localización.

En las Figuras 8 y 9 se puede observar los resultados hallados para las correlaciones cruzadas entre el sensor localizado a la altura del eje de rotación con los demás sensores. A partir de dichos resultados se puede apreciar el tamaño de la estela que genera el perfil oscilando para estos resultados mostrados, a frecuencia reducida de 0,015 y dos números de Reynolds: 23000 y 57000. En las figuras, y para todos los otros casos analizados, con mínima turbulencia, se puede observar cómo, considerando el valor de correlación de 0.5, los vórtices tienen un tamaño equivalente a media cuerda (0.25C hacia arriba y lo mismo hacia abajo), mientras que si consideramos cualquier valor positivo de correlación, dicho tamaño alcanza un valor cercano al valor de 0.8~0.9 cuerdas.

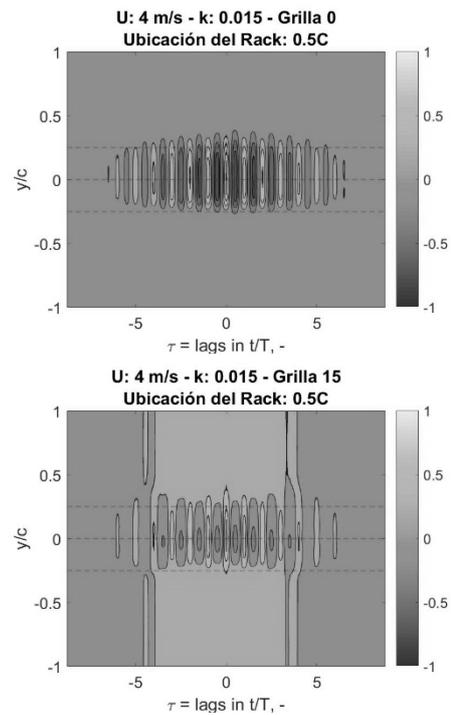


Fig. 8: Correlación cruzada de los distintos sensores respecto al sensor ubicado a la altura del eje de rotación para una ubicación del rack a media cuerda de distancia aguas abajo. Ambas condiciones de turbulencia.  $Re = 23000, k = 0.015$ .

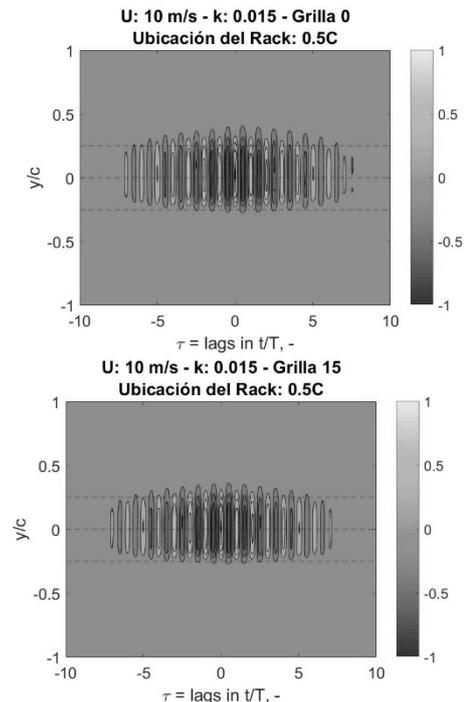
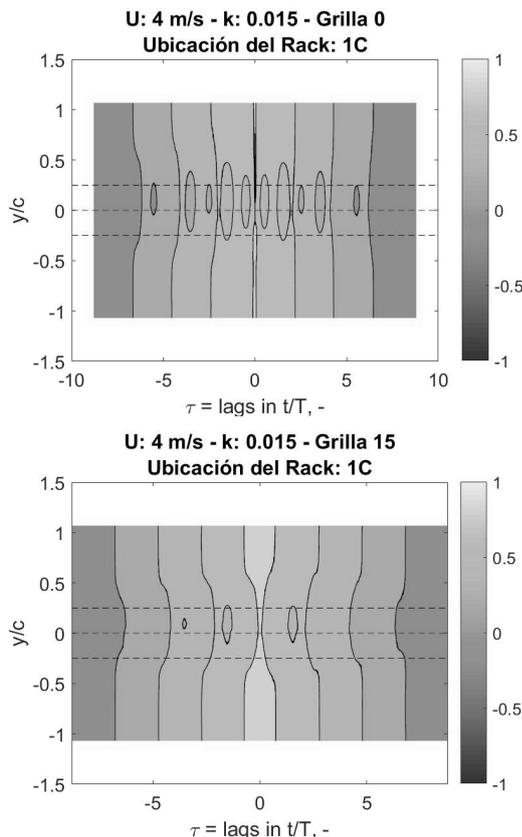


Fig. 9: Correlación cruzada de los distintos sensores respecto al sensor ubicado a la altura del eje de rotación para una ubicación del rack a media cuerda de distancia aguas abajo. Ambas condiciones de turbulencia.  $Re = 57000, k = 0.015$ .

Por otro lado, al analizar la influencia del aumento de la turbulencia, se puede observar como la correlación disminuye rápidamente al desplazar la señal temporalmente, aunque se mantiene el tamaño de los vórtices. Este efecto se va mitigando a medida que se aumenta el número de Reynolds, observándose a un Reynolds de 57000 un comportamiento muy similar al de mínima turbulencia. Si el análisis se concentra sobre el primer ciclo, el tamaño del

vórtice posee un tamaño similar a los encontrados en condiciones de mínima turbulencia, pero, al analizar la correlación disminuye como es de esperar, producto de las propiedades de disipación viscosa de la turbulencia, mientras que para una condición de mínima intensidad de turbulencia es más homogéneo el tamaño de los desprendimientos a lo largo del tiempo.

Al igual que para la estación ubicada a media cuerda de distancia, se realizó el mismo análisis de correlación cruzada, esperando encontrar menores valores de correlación dado que nos encontramos más alejados del perfil. En la Figura 10 se pueden observar los resultados para el caso de análisis de Reynolds 23000. En dicha figura se puede observar como el patrón de vórtices definidos y con la periodicidad esperada, dominada por la frecuencia del movimiento del ala, empieza a desaparecer. Además, se empiezan a encontrar valores altos de correlación en las zonas por fuera de la estela, marcando que los vórtices han sido difuminados en el campo del flujo. Otro punto a destacar es que las zonas que indicarían presencia de vórtices se encuentran desplazadas del centro hacia arriba, en comparación con lo encontrado en los resultados a una distancia de media cuerda por detrás del perfil. Una vez más, al aumentar la intensidad de turbulencia, y principalmente a valores mayores de número de Reynolds, los efectos de correlación se encuentran difuminados y menos periódicos.

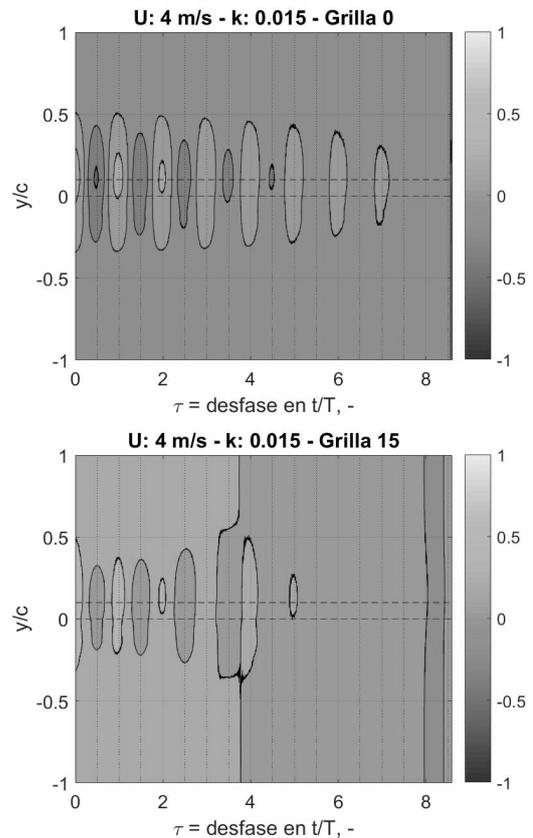


**Fig. 10:** Correlación cruzada de los distintos sensores respecto al sensor ubicado a la altura del eje de rotación para una ubicación del rack a una cuerda de distancia aguas abajo. Ambas condiciones de turbulencia.  $Re = 23000, k = 0.015$ .

Por otro lado se analizaron las correlaciones cruzadas, pero realizadas entre las dos estaciones de medición. Se consideró como señal de referencia la localizada en la altura del eje de rotación de la estación ubicada a media cuerda del ala, y se la comparó con todas las presiones en la estación

localizada a una cuerda de distancia. De esta forma, podemos analizar el desplazamiento de los vórtices, si hay desfase temporal y si los mismos se desplazan verticalmente. Para mayor claridad, solo se muestran los desfases temporales positivos, y se colocaron líneas punteadas, como referencia, en los valores de  $y/c$  de 0 y 0.1, para marcar el desplazamiento de los vórtices.

En la Figura 11 se puede observar como para todos los casos, el centro de los vórtices, denotado por el valor de máxima correlación, se ha desplazado un valor de 0.1 cuerdas, hacia arriba al trasladarse aguas abajo media cuerda. A su vez, la periodicidad sigue marcada por la frecuencia del movimiento del ala, sin encontrarse un desfase en dicho sentido. Nuevamente, al analizar el efecto de la turbulencia, encontramos menores valores de correlación cuando se aumenta la turbulencia, como era de esperarse.

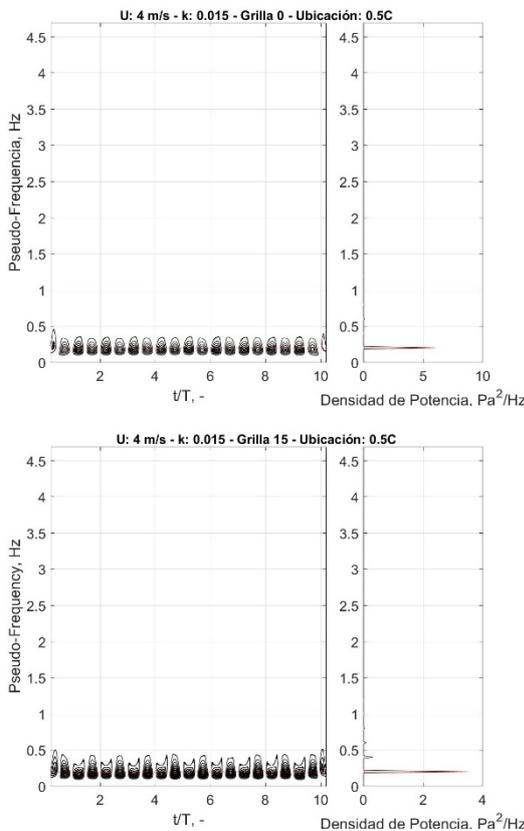


**Fig. 11:** Correlación cruzada entre el sensor localizado a la altura del eje de rotación de la estación 0.5 C y los sensores de la estación 1C, para el caso de Reynolds 23.000,  $k = 0.015$  y ambas intensidades de turbulencia.

Para completar el análisis del campo de presiones en la estela, se procedió a realizar un análisis en el espacio de frecuencias, utilizando las técnicas de transformación de Fourier y wavelet. Dado que ambos análisis están relacionados, por su interés en conocer las componentes en frecuencias de las señales, se mostrarán los resultados en el mismo gráfico. En la sección izquierda se podrá observar el análisis mediante la transformación de wavelet, utilizando como onda de referencia la segunda derivada de la distribución gaussiana, conocida como sombrero mexicano, por su forma. En la derecha, se graficará la densidad de potencia en función de la frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier. En ambas gráficas se agrega como referencia una línea punteada con el valor de la frecuencia del movimiento del ala. Cabe destacar, que mientras la transformada de Fourier es exacta en frecuencias,

pero no se puede obtener información de la locación temporal en la señal, la transformada wavelet, es capaz de resolver tanto en frecuencias como en tiempo. Sin embargo, al tener información temporal, pierde exactitud en el campo de las frecuencias la transformada Wavelet, es por eso que en el eje se puede observar la pseudofrecuencia, que queda determinada en función de la escala de la onda, principalmente.

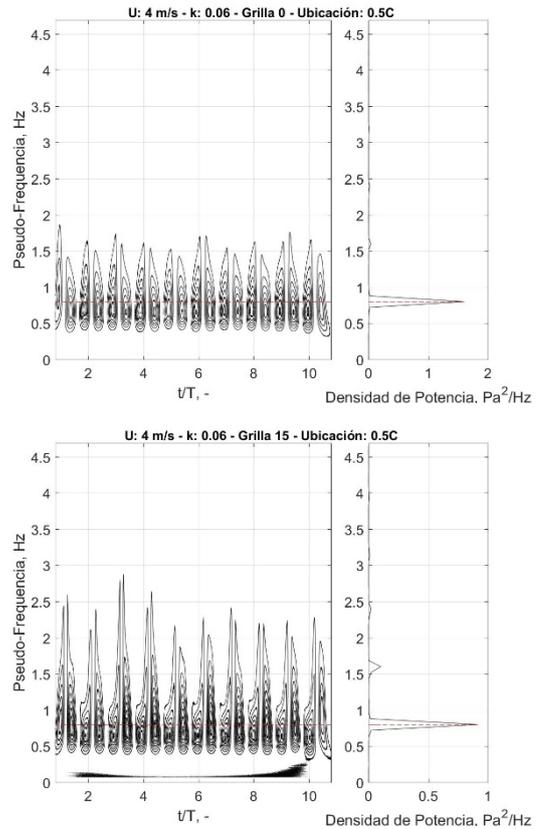
En las Figuras 12 y 13 se muestran los resultados para el caso de Reynolds 23000, de ambas intensidades de turbulencia y de la mínima y máxima frecuencia reducida, para las señales adquiridas media cuerda aguas abajo del borde de fuga con el sensor ubicado a la misma altura que el eje de rotación. En la Figura 14 se puede observar el mapa de wavelet para la condición de Reynolds 23000 en la máxima frecuencia reducida y ambas turbulencias, pero comparando las señales de distintos sensores, ubicados hacia arriba y abajo del eje de rotación.



**Fig. 12:** Análisis en frecuencia del sensor ubicado a la altura del eje de rotación, para  $Re = 23000$  y  $k = 0,015$ , en ambas intensidades de turbulencia, una distancia de media cuerda aguas abajo.

Como primer resultado se puede observar como el pico de frecuencias hallado en la densidad de potencia coincide perfectamente con la frecuencia del movimiento del ala, como era esperable, para todos los casos analizados (Figuras 12 y 13). A su vez, como se viene demostrando a lo largo de los análisis anteriores, al aumentar la intensidad de turbulencia, la densidad de potencia disminuye, indicando que la energía se encuentra disipada, producto del intercambio de energía entre las capas de aire. Otro punto que denotar, observando los resultados del mapa de wavelets, es que para la estación ubicada media cuerda aguas abajo, el primer vórtice ocurre en el valor del 70% del ciclo, es decir 0.2 periodos después que el ala alcanzó el máximo valor de ángulo de ataque. Luego de ellos, los vórtices

aparecen espaciados cada 0.5 periodos, lo que indica el fin de cada rampa (ascendente o descendente), como se puede observar en la Figura 15.



**Fig. 13:** Análisis en frecuencia del sensor ubicado a la altura del eje de rotación, para  $Re = 23000$  y  $k = 0,06$ , en ambas intensidades de turbulencia, una distancia de media cuerda aguas abajo.

Otro punto por destacar es que, al aumentar la frecuencia reducida del movimiento, la banda de frecuencias en la señal de presiones empieza a expandirse, demostrando que en el fluido hay vórtices con mayor variedad de frecuencias, aunque siempre concentradas en torno a la frecuencia del movimiento. Este efecto se ve destacado en el mapa de wavelets, donde los contornos marcados se ven más “estirados”. El mismo efecto se observa en la densidad de potencia, donde el pico deja de ser tan estrecho.

Analizando el mapa de wavelets y la densidad espectral en distintos sensores, Figura 14, se puede observar cómo, al igual que con las correlaciones cruzadas, tras analizar sensores por fuera de la banda de 0.25C los efectos de los vórtices desprendidos pierden efecto y es difícil encontrarlos, especialmente para el caso con intensidad de turbulencia del 1% (grilla 15).

## CONCLUSIONES

Se llevaron a cabo mediciones en túnel de viento de una placa plana con movimiento de cabeceo puro a diferentes frecuencias reducidas, números de Reynolds e intensidades de turbulencia para comparar el efecto de la turbulencia en la aerodinámica de dicho movimiento.

Las mediciones llevadas a cabo mediante balanza aerodinámica muestran los efectos no estacionarios producto de la dinámica del ala, obteniendo mayores valores de sustentación a medida que se aumenta la frecuencia reducida

del movimiento como se menciona en la literatura, para el movimiento ascendente. A su vez, también se encuentra un incremento en la histéresis del coeficiente de sustentación cuando se lo visualiza respecto al ángulo de ataque, que produce un decrecimiento en la fuerza de sustentación en la zona descendente del movimiento. Este fenómeno se intensifica para valores de ángulo de ataque mayores al de pérdida estática ( $7^\circ$ ). Al comparar los efectos de la turbulencia (intensidad de turbulencia 0.5% respecto a 1%), no se encontraron diferencias sensibles en los resultados de cargas aerodinámicas, como si se habían encontrado en trabajos anteriores con efectos no estacionarios no periódicos.

como en los mapas de wavelets, una reducción en la energía de las estructuras coherentes. Además, al analizar la densidad de potencia en frecuencias, el duplicar la intensidad generó una reducción al 50% de la energía de los picos, aproximadamente. El efecto de reducción de la energía de los picos era esperado, dado que la turbulencia tiene propiedades disipativas. A su vez, se encuentra que el efecto de las estructuras vorticosas, una cuerda aguas abajo prácticamente es despreciable, o de muy baja intensidad.

REFERENCIAS

- [1] Algozino S., Delnero J., Maraño Di Leo J. y Capittini G. (2018) "Turbulence effect on flat plate pitching airfoil" *Fluid Dynamics Conference, AIAA AVIATION Forum*. Atlanta, Georgia, EE. UU.
- [2] Aramburu A., Morales J., Algozino S. y Maraño Di Leo (2016). "Influencia de la turbulencia en las características aerodinámicas de perfiles de bajo Reynolds". *4º Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica*. Córdoba, Argentina.
- [3] Brown R. H. J. (1948) "The Flight of Birds—The Flapping Cycle of the Pigeon" *Journal of Experimental Biology*, Vol. 25, No. 4, pp. 322–333.
- [4] Eldredge J. D., Wang C. J. y Ol, M (2009) "A Computational Study of a Canonical Pitch-Up", Pitch-down Wing Maneuver" *39th AIAA Fluid Dynamics Conference. AIAA AVIATION Forum*. San Antonio, Texas, EEUU.
- [5] Ellington C. P. (1984) "The aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics" *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences*. 305. 1-15.
- [6] Farge M. (1990) "Transformée en ondelettes continue et application a la turbulence" *Journ. Annu.Soc. Math., France*, 17-62.
- [7] Jadhav G. y Massey K. (2007). "The development of a miniature flexible flapping wing mechanism for use in a robotic air vehicle". *AIAA Paper 2007-668*.
- [8] Schneider K. y Vasilyev O. V. (2010) "Wavelet methods in computational fluid dynamics" *Annual Review of Fluid Mechanics*, Annual Reviews, Vol. 42, pp.473-503.
- [9] McCroskey W. J. (1981) "The Phenomenon of Dynamic Stall", NASA TM 81264.
- [10] Mueller D., Bruck H.A. y Gupta S.K. (2010). "Measurement of thrust and lift forces associated with drag of compliant flapping wing for micro air vehicles using a new test stand design". *Experimental Mechanics* Vol 50 (6), 725–735.
- [11] Ol M. V. y Babinsky H. (2016) "Unsteady Flat Plates: a Cursory Review of AVT-202 Research (Invited)" *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. AIAA SciTech 2016*.
- [12] Shyy W., Berg M. y Ljungqvist D. (1999). "Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles". *Progress in Aerospace Science* Vol 35 (5), p.p. 455–505.

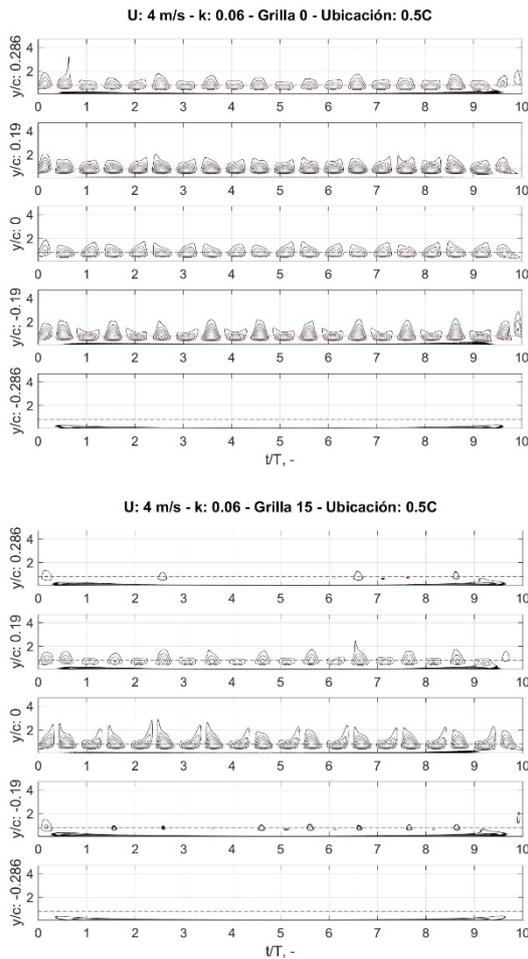


Fig. 14: Análisis en frecuencia de distintos sensores en altura, para una distancia de media cuerda aguas abajo, a  $Re = 23000$  y  $k = 0,06$ .

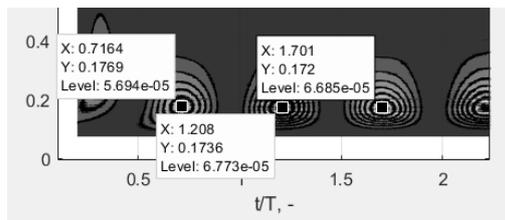


Fig. 15: Análisis de la aparición temporal de los vórtices para la condición de Reynolds 23000 con mínima turbulencia en la estación 0.5C y  $k = 0.015$ .

Por otro lado, mediante la medición en simultáneo de las presiones en la estela a distintas alturas con rack de presiones, se caracterizó la misma encontrando efectos notorios de la turbulencia. Al incrementar la intensidad de turbulencia se observa, tanto en correlaciones cruzadas,