

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE GENERADORES DE VÓRTICES SOBRE UN PERFIL EPPLER 387 EN FLUJO TURBULENTO

J.S. Delnero, J. Marañón Di Leo, M. Camocardi, D.G. François y J. Colman

^a Departamento Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 116 e/ 47 y 48, La Plata, Argentina

^b CONICET Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Avda. Rivadavia 1917, CP
Email: delnero@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es estudiar la influencia de los generadores de vórtices, como dispositivos pasivos de control de flujo, sobre los coeficientes aerodinámicos de un perfil Eppler 387 inmerso en flujo turbulento, con el propósito de obtener una mejora en la performance aerodinámica. Para llevar a cabo este objetivo se construyó un modelo de ala de 42 cm de cuerda y 80 cm de envergadura al que se le implementaron generadores de vórtices de diferentes configuraciones, con una relación longitud/altura igual a cuatro, colocados en diferentes posiciones medidas desde el borde de ataque.

El flujo turbulento incidente se caracterizó a través de un anemómetro de hilo caliente a temperatura constante. Para la determinación de los coeficientes aerodinámicos se midieron valores de carga mediante una balanza aerodinámica. El modelo va sujeto por medio de dos celdas de carga entre dos paneles para asegurar la bi-dimensionalidad del flujo incidente. El ensayo consistió en ir variando el ángulo de ataque del perfil desde valores negativos hasta más allá de la pérdida en intervalos de 1 grado e ir adquiriendo valores de temperatura, velocidad, sustentación y resistencia. Este procedimiento se repitió tanto para el perfil solo, como para el perfil con generadores de vórtices en diferentes configuraciones.

Palabras clave: Generadores de vórtices, Control de Flujo, Turbulencia, Perfil alar.

INTRODUCCIÓN

El control del flujo sobre un cuerpo incluye todo tipo de mecanismo o proceso a través del cual el flujo en el entorno del cuerpo es llevado a un comportamiento diferente del que exhibiría si se desarrollara normalmente en la ausencia de dichos mecanismos y/o procesos [1].

El control del flujo involucra dispositivos pasivos y activos que provocan un cambio, en flujos de pared y/o flujos de corte libres [2], [3]. Los objetivos del control de flujo en general consistirán, de acuerdo con la conveniencia, en retrasar o adelantar la transición, suprimir o aumentar la turbulencia, prevenir o provocar la separación, con el propósito de reducir la resistencia aerodinámica, aumentar la sustentación, aumentar la mezcla de flujo, inducir la reducción del ruido por métodos fluido-dinámicos [4],[5].

En el rango de bajos Reynolds, el flujo separado se orienta según la tangente a la superficie en el punto de separación y la transición a turbulento tiene lugar en la capa de corte libre debido a la creciente susceptibilidad de ésta a la transición. La entrada de fluido turbulento de la zona de mayor velocidad provoca la re-adhesión del flujo externo, constituyendo lo que se denomina, burbuja de separación laminar. Aguas abajo del punto de re-adherencia, la recientemente formada capa límite turbulenta tiene más energía disponible para luchar contra el gradiente adverso de presiones evitando la separación y la consecuente entrada en pérdida [6]. La habilidad de la capa límite turbulenta para resistir la separación es tanto mejor a medida que crece el número de Reynolds [7]. Las condiciones para que se forme esta burbuja laminar son función del número de Reynolds, la distribución de presiones, la curvatura y rugosidad de la superficie, y la turbulencia de la corriente incidente, como así también de otros factores del entorno.

La formación de la burbuja de separación está estrechamente vinculada con un rango del número de Reynolds, y este rango cambia entre los diferentes perfiles y con las condiciones del flujo en el entorno de los mismos. En general podremos afirmar que, un perfil con un número de Reynolds basado en la cuerda por debajo de 50000, exhibir   una separación laminar sin la subsecuente re-adherencia [9]. Para números de Reynolds algo mayores, resulta esperable la formación de una burbuja de recirculación de gran extensión. Las burbujas de menor extensión, se forman a Reynolds más altos [10]. La separación laminar se da entre 50000 y 300000 de número de Reynolds.

Los perfiles de bajo Reynolds delgados presentan un pico de presiones muy acusado en el borde de ataque que hace desprender la capa límite laminar prontamente. La pérdida depende del radio de borde de ataque, y del espesor relativo t/c (t : espesor, c : cuerda). La entrada en pérdida se produce entonces con desprendimientos en el borde de fuga que avanzan por el extradós hacia el borde de ataque, a medida que se incrementa el ángulo de ataque, esto en general produce lo que se denomina una pérdida suave y no una abrupta como es el caso de perfiles delgados a altos Reynolds. Es evidente que existe alguna relación entre los desprendimientos o la circulación del perfil cuando el flujo incidente es turbulento de diferentes configuraciones [11], [12].

Para tratar de comprender esto, sabemos que cuando un flujo atraviesa un perfil, este genera sobre él una capa límite, cuyo espesor es función del número de Reynolds y la cuerda del mismo. Esta capa límite de acuerdo a la geometría del perfil y a las características del flujo puede ser laminar o turbulenta. Es sabido que de acuerdo al perfil de velocidades medias de una capa límite laminar y una turbulenta, el caso laminar al tener menor rozamiento genera menor resistencia, pero tiene el inconveniente de no ser resistente a los gradientes adversos de presión como el caso turbulento [13]. En nuestro caso tenemos un flujo incidente con una determinada intensidad y escala espacial de turbulencia ba  nando al perfil. Estos vórtices incidentes actúan sobre la capa límite de los perfiles, algunos de dichos vórtices, embebidos en el flujo incidente, al chocar con el borde de ataque del perfil se pueden desarmar, estirar, deformar, mezclar y cambiar su orientación. Al mismo tiempo esos vórtices actúan sobre la capa límite deformándola e inestabiliz  ndola pudiendo producir separaciones locales fluctuantes de la misma, que en esas regiones se transforman en capas de corte que se desprenden y enrollan produciendo nuevos vórtices [14], [15]. Toda esta configuración fluidodinámica es la que determina la circulación del perfil y por lo tanto la sustentación y la resistencia.

La presencia de dispositivos generadores de vórtices sobre el extradós de los perfiles, actuando como elementos pasivos de control de flujo, modifican totalmente el flujo alrededor del mismo, variando la circulación y por lo tanto la sustentación del mismo. Es evidente que con estos dispositivos no existirá separación laminar, debido a la gran mezcla de flujos que estos producen. Lo importante sería tratar de comprender en que medida afectan o modifican la configuración del flujo sobre el perfil cuando son ba  nados con flujos turbulentos.

La pregunta que surge sobre estos temas es cómo controlar el flujo alrededor de perfiles de bajos Reynolds con el propósito de aumentar su performance. En nuestro caso utilizaremos los generadores de vórtices de diferentes configuraciones y colocados en diferentes posiciones de manera de estudiar el comportamiento del perfil en flujos turbulentos caracterizados, previamente [16], [17].

METODOLOGÍA

Para la realización del trabajo antes planteado se construyó una sección alar con un perfil Eppler 387 modificado que cuenta con una cuerda de 42 cm y una envergadura de 80 cm [18]. Se construyeron los generadores de vórtices de forma triangular, con una relación de aspecto de 0.25, longitud de 40 mm, altura de 10 mm, espesor de 0,5 mm. La separación entre los generadores es de 8 veces la altura del generador. El sistema cuenta con servomecanismos a distancia para controlar la actitud del ala. El modelo fue montado dentro del túnel de viento, cuya sección es de 1,4 m de ancho por 1 m de ancho, entre dos paneles paralelos de modo de conseguir una configuración bi-dimensional del flujo entorno a la misma. El ala va acoplada mediante dos celdas de carga a un eje colocado al cuarto de cuerda, y estas fijas al túnel. El   ngulo de ataque se modifica mediante el uso de servomecanismos adosados al perfil. Los generadores fueron colocados sobre el extradós del perfil en dos posiciones, al 10% y al 20% de cuerda medida desde el borde de ataque. Los generadores tomaban 3 configuraciones con

respecto a la corriente libre, a 0° , a 10° y a 20° con respecto al flujo incidente. Los ensayos realizados consistieron en la medición de cargas con el objeto de obtener los coeficientes aerodinámicos y poder determinar las condiciones de pérdida del perfil cuando es bañado por un flujo incidente predeterminado. Se adquirieron valores de temperatura, velocidad, sustentación y resistencia, y los valores de carga fueron corregidos por temperatura.

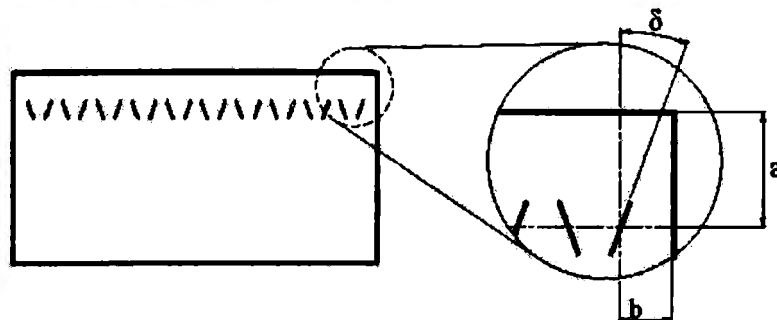


Figura 1. Posición de los generadores de vórtices

En la **Figura 1** se muestran cómo van dispuestos los generadores de vórtices sobre el extradós del ala. En la imagen ampliada se observa que "a" es la distancia desde el borde de ataque hasta el centro de los generadores de vórtices, "b" es la distancia entre los dispositivos y " " es el ángulo de los dispositivos con respecto a la corriente incidente.

Para medir las cargas utilizamos una balanza aerodinámica de dos canales a puente completo. Con uno de los canales medimos la sustentación y con el otro canal la resistencia que genera el ala. Esta operación se realiza por medio de un software que adquiere la señal de la celda a la salida de los acondicionadores. Se fija una frecuencia de adquisición así como también los filtros de la señal. En nuestro caso trabajamos con un filtro pasa bajo de 10 Hz y una frecuencia de 500 Hz por canal. El tiempo de muestreo es de aproximadamente 16.3 seg. Esta operación debe realizarse para ambos canales de adquisición. El número de muestras es de 8192 para cada canal.



Figura 2. Equipamiento de medición de cargas en el túnel de viento

El   ngulo de ataque se va variando desde los -10° hasta después de la pérdida del perfil, con intervalos que pueden ir de 0.5° hasta 2° , dependiendo del comportamiento del perfil [19].

Para la caracterización de la turbulencia se utilizó un anemómetro de hilo caliente de seis canales marca Dantec Streamline. Los ensayos se realizaron a una velocidad de 8 m/seg, lo que corresponde a un número de Reynolds de 225000.

Se caracterizaron dos flujos turbulentos para el ensayo. La turbulencia 1 se realizó a 8 m/seg con una intensidad de turbulencia de 2%. Para la turbulencia 2, la velocidad fue de 8 m/seg, con una intensidad de turbulencia de 3,7% [19]. En la **Figura 2** se muestra el equipamiento de ensayo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Generadores de vórtices al 10% y 20% desde el borde de ataque (turbulencia 2 – turb2).

Para los generadores de vórtices colocados al 10% de la cuerda desde el borde de ataque se observa que prácticamente no hay variación en la pendiente del perfil, para los casos con los generadores de vórtices y el ala limpia (Figura 3). Tampoco se ve una variación en el ángulo de sustentación nula. Si puede observarse un cambio en el coeficiente de sustentación máximo (C_{Lmax}). A medida que aumenta el ángulo del generador de vórtices con respecto al flujo incidente el C_{Lmax} va aumentando llegando a su valor máximo correspondiente al generador de vórtices a 20° con respecto al flujo incidente sobre el extradós del perfil.

En general observando las gráficas se ve que el perfil solo, genera menos resistencia que cualquiera de las alas con los dispositivos generadores de vórtices, como era de esperarse. Se puede observar que cuando los generadores de vórtices están a 0° con respecto a la corriente libre generan prácticamente la misma resistencia (Figura 5).

En la gráfica C_D vs. α , se ve como las curvas se apartan a medida que el ángulo de ataque se incrementa. Como era de esperarse a grandes ángulos de ataque el coeficiente de resistencia aumenta para los generadores de vórtices con mayor ángulo de desviación respecto del flujo incidente.

Para la posición de los generadores de vórtices al 20% de la cuerda, no se observan cambios en la pendiente de las curvas, pero sí en el ángulo de sustentación nula y en los C_{Lmax} . Prácticamente se repite la tendencia que se daba para los generadores de vórtices al 10%, o sea a medida que se incrementa el ángulo del generador, el C_{Lmax} se incrementa (Figura 4).

En la gráfica C_D vs. α , para la posición de los generadores de vórtices colocados al 20% de la cuerda, se ve que se repite la tendencia exhibida por los generadores colocados al 10% de cuerda, o sea a medida que el ángulo de ataque aumenta la resistencia es mayor en los dispositivos con mayor ángulo de desviación respecto a la corriente incidente (Figura 6).

Comparando los generadores de vórtices ubicados en la posición del 10% de la cuerda, se puede observar que con el incremento de δ se produce un aumento del C_L , comparado con el perfil sin los dispositivos.

Para el caso de los dispositivos ubicados al 20%, se puede ver que el comportamiento es similar.

Observando las polares, estas son muy similares, y se aprecia nuevamente que cuanto mayor es el ángulo de los generadores de vórtices, mayor es la resistencia.

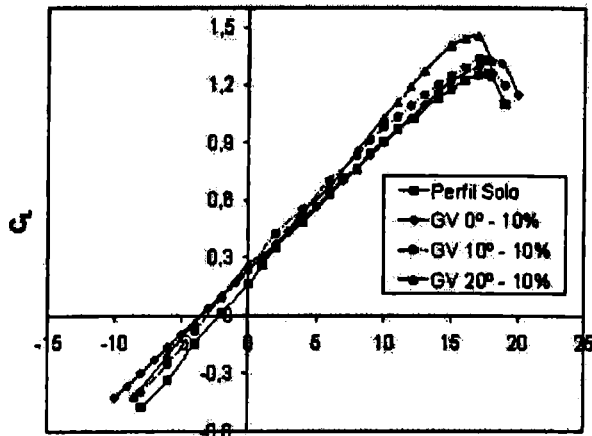
Tabla 1. Valores característicos para los ensayos de los perfiles con generadores de vórtice en turb 2

Dispositivo	Turb	Alfa $C_l = 0$	C_l alfa = 0	C_l max	Alfa max	C_{D0}	E_{max}	alfa (E_{max})
sin GV	turb 2	-2	0.163	1.26	17.75°	0.0475	10.24	7°
GV 0° - 10%	turb 2	-3.5	0.236	1.31	18.75°	0.0485	10.08	10°
GV 10° - 10%	turb 2	-3.25	0.236	1.34	17°	0.0581	9.76	8°
GV 20° - 10%	turb 2	-3.5	0.261	1.45	17°	0.0501	9.23	6°
GV 0° - 20%	turb 2	-3.25	0.221	1.37	18°	0.0481	10.68	8°
GV 10° - 20%	turb 2	-3.5	0.271	1.51	17.75°	0.0518	9.68	8°
GV 20° - 20%	turb 2	-3.25	0.269	1.48	17°	0.0531	9.86	7°

La Tabla 1 muestra los valores característicos para el perfil solo y el perfil con los generadores de vórtices. Se muestra el valor del ángulo de sustentación nula, el C_L para ángulo de ataque nulo, el C_L máximo que alcanza el perfil con su correspondiente ángulo máximo, el valor del coeficiente de resistencia para coeficiente de sustentación nulo, el valor de la eficiencia máxima y el ángulo para el cual se da dicha eficiencia.

En las Figuras 3, 4, 5 y 6 se muestran solo las curvas de los coeficientes de sustentación y resistencia para dos posiciones de los generadores de vórtices en la turbulencia 2.

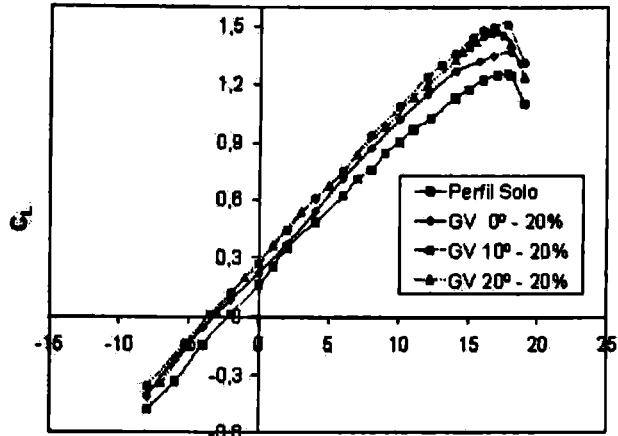
E-387 - C_L vs α - Gen. de V rtices - 10% - Turb 2



Angulo de Incidencia (Grados)

Figura 3. Curva C_L vs α

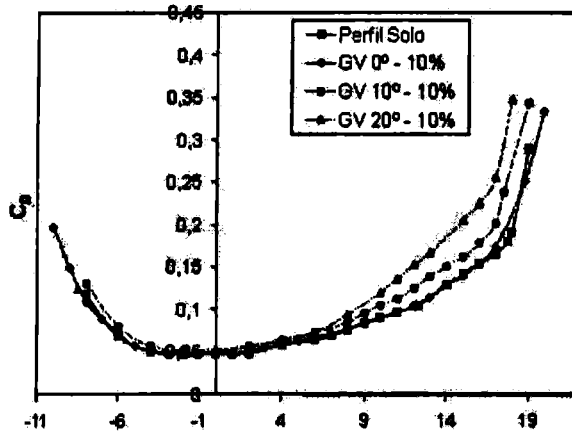
E-387 - C_L vs α - Gen. de V rtices - 20% - Turb 2



Angulo de Incidencia (Grados)

Figura 4. Curva C_L vs α

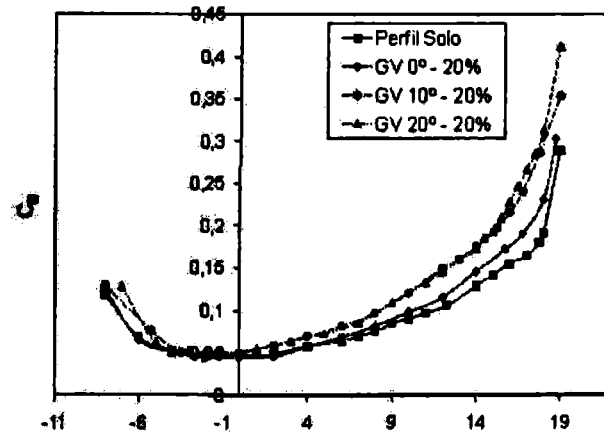
E-387 - C_D vs α - Gen. de V rtices - 10% - Turb 2



Angulo de Incidencia (Grados)

Figura 5. Curva C_D vs α

E-387 - C_D vs α - Gen. de V rtices - 20% - Turb 2



Angulo de Incidencia (Grados)

Figura 6. Curva C_D vs α

Generadores de vórtices al 10% y 20% desde el borde de ataque (turbulencia 1 – turb1)

Para los generadores colocados al 10% de la cuerda, no hay variación en las pendientes ni ángulos de sustentación nula de los perfiles, las gráficas est n prácticamente superpuestas. Los cambios se producen en la zona de los máximos C_L y la pérdida.

Se aprecia que al aumentar el ángulo de los generadores de vórtices, el C_L máximo aumenta, pero en general el ángulo de ataque para el C_L máximo se mantiene constante.

El comportamiento al 20% es similar al de 10%, o sea tienen la misma pendiente y ángulo de sustentación nula y los cambios solo se ven en la zona de la pérdida. El C_L máximo se produce prácticamente al mismo ángulo (pérdida). La pérdida es en general suave y similar para todos los casos.

Con respecto a la resistencia, no se notan cambios significativos en las gráficas, para las 2 posiciones de los generadores de vórtices sobre el extradós del perfil. Se notan pequeñas diferencias en el C_{D0} , igualmente para ambos casos el perfil solo es el que genera menor resistencia. La tendencia que se observa es que a medida que aumenta el ángulo del generador de vórtices con respecto a la corriente libre aumenta la resistencia, sin importar la posición de los generadores de vórtices sobre el extradós.

Comparando los C_L para los diferentes ángulos δ se ve que el perfil solo (ala limpia), entra en pérdida primero siempre.

Tabla 2. Valores característicos para los ensayos de los perfiles con generadores de vórtices en turb 1

Dispositivo	Turb	Alfa $C_L = 0$	C_L $\alpha = 0$	C_L max	Alfa max	Cdo	E max	alfa (E max)
sin GV	turb 1	-3.75	0.333	1.488	16�	0.0486	10.81	4�
GV 0� - 10%	turb 1	-4.25	0.358	1.489	16�	0.055	10.02	4�
GV 10� - 10%	turb 1	-4.25	0.364	1.532	16�	0.056	9.78	4�
GV 20� - 10%	turb 1	-4.25	0.35	1.589	16�	0.058	9.28	8�
GV 0� - 20%	turb 1	-3.75	0.332	1.431	17�	0.0523	9.381	6�
GV 10� - 20%	turb 1	-4.5	0.341	1.534	17�	0.0531	9.08	6�
GV 20� - 20%	turb 1	-4.25	0.342	1.562	16�	0.06	9.2	6�

Comparación entre las configuraciones turbulentas (turb 1 y turb 2)

Para los generadores de vórtices a $\delta = 0^\circ$, los que est n inmersos en la turb 1 generan más C_L que los inmersos en la turb 2 para cualquier ángulo de ataque.

El menor C_L se obtiene con la turb 2 con los generadores de vórtices a $\delta = 0^\circ$ y ubicados al 10% de la cuerda para cualquier ángulo de ataque. Mientras que el mayor C_L se obtiene con la turb 1 con el mismo dispositivo (generador de vórtices a 0° y 10%), también para cualquier ángulo de ataque.

Se ve claramente que en estos dispositivos para el caso en el que se llega a un C_L máximo mayor en general entra en pérdida a un ángulo menor, o sea que se adelanta la pérdida.

Para los generadores de vórtices a $\delta = 10^\circ$ y 20° se ve idéntico comportamiento. Con respecto a la resistencia se puede observar que para la turb 2 siempre es menor, sin importar el ángulo δ , ni la posición sobre el extradós. Recordemos que turb 1 tiene menor intensidad de turbulencia que la turb 2.

Efectos de los generadores de v rtice sobre los perfiles de bajos números de Reynolds.

Como fue observado en los resultados obtenidos de las experiencias realizadas, estos dispositivos generadores de vórtices colocados sobre perfiles consiguen incrementos en el valor del C_{Lmax} , respecto al caso del perfil solo. Además, se observa una diferencia en el caso de aumentar el ángulo δ de desviación respecto a la corriente libre.

Los resultados indican que los generadores de vórtices producen un flujo alrededor y aguas abajo de ellos, de la misma forma que el que se genera en un ala delta [20], [21], provocando un desorden en el flujo interior y exterior a la capa límite, posición en la cual se supone a la misma totalmente turbulenta, de forma tal que el C_{Lmax} aumenta pero el ángulo de pérdida disminuye muy poco o se mantiene constante. Se observa también que en todos los casos la pérdida es suave. La curva aumenta un poco la pendiente de la zona cuasi lineal.



Figura 7. Perfil con generadores de vórtices

Es posible que el incremento que se produce en la sustentación sea por un aumento en la circulación alrededor del perfil, generado por un gradiente favorable de presiones que estabiliza la capa límite sobre el extradós. Cada generador de vórtices produce un v rtice tipo helicoidal que interactúa con la capa límite y modifica la configuración del flujo detrás de los dispositivos [22]. Esto produce que el flujo incidente "vea" un perfil de mayor espesor, lo que explicaría el aumento de la sustentación.

El coeficiente de resistencia se mantiene casi constante para bajos ángulos de ataque, con un valor inferior para el caso sin el dispositivo. A medida que se incrementa el ángulo de ataque el C_D aumenta, siendo más importante está variación para la zona de pérdida del perfil. Este incremento resulta de la interacción entre los vórtices generados y el espesor de la capa límite.

Un v rtice helicoidal determinado con alas deltas similares a los generadores utilizados, tiene una estabilidad determinada, en general, por el número de Reynolds y por la intensidad de la turbulencia [23]. Cuanto más intenso es el flujo, más rápido estalla el v rtice. Esto trae aparejado que sobre el perfil, cuanto más dure el v rtice, más flujo mezcla con la capa límite y por lo tanto el flujo exterior

verá un perfil con mayor espesor, por consiguiente con mayor circulación (nuevamente se tiene un incremento de curvatura del perfil que ve el flujo, dado que los dispositivos se encuentran en el extradós) y obteniendo C_L mayores. Si en cambio el vórtice estalla, genera un flujo con menor energía, el cual produce menos mezcla, el flujo externo verá un perfil más delgado, por lo tanto habrá menor circulación y menor C_L .

CONCLUSIONES

En las visualizaciones realizadas no se advierte una formación o una separación laminar, o sea no se producen separaciones locales laminares con re-adherencia como se reportó en este tipo de perfiles en flujo laminar. Si se observó la entrada en pérdida que se produce con desprendimientos desde el borde de fuga hacia el borde de ataque sobre el extradós. Esto causó que las entradas en pérdidas sean suaves y no abruptas como sucede en el flujo laminar y a números de Reynolds un poco más bajos (1×10^5) con este tipo de perfiles.

Otra prueba de que no se aprecia separación laminar la dan las curvas de coeficiente de resistencia vs. ángulo de ataque. Si hubiese separación laminar con la subsiguiente separación en flujo turbulento a medida que se incrementa el ángulo de ataque, se observaría un incremento importante en la resistencia [24]. Dicho comportamiento no se observa en ninguno de los experimentos. Al contrario, la resistencia se incrementa paulatinamente aún cuando se produce la pérdida del perfil y hasta llegar a la doble pérdida, luego crece mucho más rápido. Esto nos indicaría que el perfil en estas condiciones está compuesto por una capa límite turbulenta que se genera en el borde de ataque y que es resistente a los gradientes adversos de presiones [25].

Con respecto al fenómeno de histéresis que reportan a bajos números de Reynolds, se verifica que con flujos turbulentos este efecto desaparece por completo, no se observó histéresis en ningún caso. Recordemos que se habían reportado casos de histéresis en bajos Reynolds (100000) con una intensidad de turbulencia de 0,5 a 1%. Esto es debido en gran medida a que este fenómeno estaba determinado en general por la burbuja de borde de ataque. En el tipo de perfiles utilizados y con el flujo incidente, se produce una distribución de presiones sobre el extradós, que genera una entrada en pérdida suave, por lo tanto no se forma la burbuja de borde de ataque. Esto claramente nos indica que tampoco hay separación laminar, cuestión que está fluido-dinámicamente vinculada con las burbujas de borde de ataque.

En resumen, la presencia de los generadores de vórtices sobre el extradós del perfil, por lo expuesto anteriormente, nos permite afirmar que:

- ✓ Dichos dispositivos siempre aumentan el C_L
- ✓ Se generan mayores C_L cuando la turbulencia incidente es de menor intensidad.
- ✓ Con menor intensidad de turbulencia incidente, la pérdida es suave pero para un ángulo menor.
- ✓ Para intensidades de turbulencia mayores la resistencia siempre es menor.
- ✓ El perfil solo (ala limpia) siempre tiene menor resistencia que con cualquier generador de vórtices.

REFERENCIAS

1. Gad-El-Hak, M.: Flow Control: The Future. Journal of Aircraft Vol. 38 (2001).
2. F. Geraci, J. Cooper, and M. Amprikidis, "Development of Smart Vortex Generators", SPIE Smart Structures and Materials Conference, 2003, San Diego USA.
3. D. Fabre, L. Jacquin, A. Loof: "Optimal Perturbations In A Four-Vortex Aircraft Wake In Counterrotating Configuration"; J. Fluid Mech., Vo. 451, 319-328 (2002).
4. Melton, L.P., Yao, C.S., Seifert, A.: Active control of separation from the flap of a supercritical airfoil. AIAA Journal Vol. 44 (2006) pp. 34-41.
5. Ralf Petz and Wolfgang Nitsche "Designing Actuators for Active Separation Control Experiments on High-Lift Configurations" First Active Flow Control Conference - September 27 - 29, 2006 - Berlin - Alemania.

6. Roos F. W. and Kegelmann J. T. (1986) "Control of coherent structures in reattaching laminar and turbulent shear layers", en *A.I.A.A.* Vol 24, pp. 1956-1963.
7. Lissaman, P.B.S. (1983) "Low-Reynolds-Number Airfoils", *Ann. Rev. Fluid Mech.* 15, pp. 223 – 239.
8. Carmichael, B. H. "Low Reynolds Number Air-foil Survey," Volume I, NASA Contractor Report 165803, November 1981.
9. Prazak, M.W., and T.J. Mueller. "Experimental Studies of an Eppler 61 Wing at Chord Reynolds Numbers from 12,000 to 63,000." Technical Note UNDAS-TN-256-1, July 1997.
10. O'Meara, M. M., and T. J. Mueller. "Laminar Separation Bubble Characteristics on an Airfoil at Low Reynolds Numbers." *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 8, August 1987: 1033-1041.
11. J.S. Delnero, J. Colman, U. Boldes, M. Martínez, J. Marañón Di Leo and F.A. Bacchi "About the turbulent scale dependent response of reflexed airfoils" *Latin American Applied Research*. Vol 35 – pp. 301 – 306 N   4 (2005).
12. E. Vassen, B. Günther and F. Thiele (Institute of Fluid Mechanics and Engineering Acoustics – Technical University Berlin – Germany) and Delnero J. S., Marañón Di Leo J., Boldes U., Colman J., Bacchi F. and Martínez M. A. (Dto. Aeron  utica – Fac. Ingeniería – UNLP – Argentina) "A Combined Numerical and Experimental Study of Mini-Flaps at Varying Positions on an Airfoils" .. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 8-11 January 2007.
13. Pohlen, Lawrence. "Experimental Studies of the Effect of Boundary Layer Transition on the Performance of the Miley (M06-13-128) Airfoil at Low Reynolds Numbers." Master's Thesis, The University of Notre Dame, January 1983.
14. Dreyden, H.L. (1948) "Recent Advances in the Mechanics of Boundary Layer Flow", en *advances in Applied Mech.*, eds. Von Mises and Th. Von K  rm  n, vol. 1, pp. 1 – 40, Academic Press, Boston, Massachusetts.
15. Gursul, I., "Review of Unsteady Vortex Flows on Aircraft, vol. 42, no. 2, March-April 2005, pp. 299-319.
16. A.S. Bovaa, R.M. Langb, G.L. Blaisdellc, J. Gibsona & T. Niessena "Investigation of Vortex Bursting at a Low Reynolds Number Using a Schlieren Visualization   cheme" *International Journal of Fluid Dynamics* (2001) Vol 5, Article 3, 31-40.
17. Andrew L. Heyes ., David A.R. Smith "Modification of a wing tip vortex by vortex generators" *Aerospace Science and Technology* 9 (2005) 469–475.
18. Eppler, R., Sommers, D.M. (1985) "Airfoil Design for Reynolds Numbers Between 50.000 and 500.000", en *Proceed. Conf. on Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics*, ed. T.J. Mueller, pp. 1 – 14, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana.
19. J.S. Delnero, J. Marañón Di Leo, F.A. Bacchi, J. Colman and U. Boldes. Experimental determination of the influence of turbulence scales on the lift and drag coefficients of low Reynolds number airfoils. *Latin American Applied Research*, 35, 183-188, 2005.
20. Russell M. Cummings, Scott A. Morton, Stefan G. Siegel, Thomas E. McLaughlin, and Julie A. Albertson "Combined Computational Simulation and PIV Measurements on a Delta Wing with Periodic Suction and Blowing" 40th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit 14-17 January, 2002.
21. Russell M. Cummings, Scott A. Morton, Stefan G. Siegel "Computational Simulation and PIV Measurements of the Laminar Vortical Flowfield for a Delta Wing at High Angle of Attack" 41st Aerospace Sciences Meeting & Exhibit - 6-9 January, 2003.
22. I. Gursul, E. Vardaki, P. Margar  s, Z. Wang "Control of Wing Vórtices" First Active Flow Control Conference – September 27 – 29, 2006 – Berlin – Alemania.
23. Taylor, G. and Gursul, I., "Buffeting Flows over a Low Sweep Delta Wing", *AIAA Journal*, vol. 42, no. 9, September 2004, pp. 1737-1745.
24. T.J. Mueller and B.J. Jansen. Aerodynamic Measurements at Low Reynolds Numbers. *AIAA Paper #82-0598*, March 1982.
25. Yarusevych S., Sullivan P.E., Kawall J.G. Airfoil boundary layer separation and control at low Reynolds numbers. *Experiments in Fluids*, 38, 545–547, 2005.