

CONTROL DEL FLUJO ALREDEDOR DE PERFILES ALARES MEDIANTE EL USO DE ACTUADORES EHD

Roberto Sosa

Laboratorio de Mecánica de Fluidos-Dpto. de Ingeniería Mecánica-Universidad de Buenos Aires-Argentina.

rsosa@fi.uba.ar

Guillermo Artana

Laboratorio de Mecánica de Fluidos-Dpto. de Ingeniería Mecánica-Universidad de Buenos Aires-Argentina.

gartana@fi.uba.ar

Resumen. En el presente trabajo se busca analizar los efectos producidos sobre el flujo alrededor de un perfil alar a bajos Re (10^4 - 10^5) perturbado por el uso de un actuador EHD operado en forma estacionaria.

Este análisis se llevo a cabo mediante el estudio de los resultados experimentales obtenidos por diferentes técnicas: la visualización del flujo mediante la inyección de humos, velocimetría por imágenes de partículas y medidas de presión en la superficie del cuerpo.

Las medidas de presión revelan la existencia de una burbuja de separación laminar corta, en las proximidades del borde de ataque del perfil, que provoca la transición de la capa límite laminar a turbulenta.

Para las condiciones estudiadas se observó un aumento de la velocidad media en la región donde se concentra la vorticidad media del escurrimiento.

Keywords: Perfil alar, Burbuja de separación laminar, Bajos Reynolds, EHD, PIV

1. Introducción

En la actualidad una gran cantidad de aplicaciones de perfiles alares operan a bajos números de Reynolds (10^4 - 10^6) como los considerados en el presente trabajo.

Entre dichas aplicaciones se encuentran entre otras:

- los vehículos piloteados en forma remota (RPVs) los cuales son utilizados para la vigilancia, relevamiento y/o monitoreo tanto en aplicaciones militares como científicas,
- los alabes de compresores y turbinas empleados en los motores a reacción operados a grandes altitudes,
- los mecanismos de control empleados en las alas de los aviones (Ej. Alerones)
- y los generadores eólicos.

Para escurrimientos alrededor de perfiles alares a números de Reynolds mayores a un millón, típicamente encontrados para grandes aviones, la transición hacia la turbulencia de la capa límite generalmente ocurre aguas arriba de la posición teórica de separación laminar. Como consecuencia de su transición hacia la turbulencia la capa límite puede afrontar mayores gradientes de presiones adversos sin separarse de la superficie del perfil (Schlichting, 1979).

En el régimen de bajos números de Reynolds, por el contrario, la capa límite se separa en forma laminar de la superficie del perfil ante la presencia de un gradiente de presiones adverso. La capa límite separada se desestabiliza rápidamente y se transforma en una capa de corte libre turbulenta. La turbulencia aumenta la transferencia de cantidad de movimiento entre las zonas del flujo de menor velocidad y las de mayor velocidad posibilitando de esta manera el repegado del flujo a la superficie del perfil. Aguas abajo del punto de repegado se desarrolla una capa límite turbulenta.

Este fenómeno donde se presenta en forma sucesiva: la separación laminar, la transición de la capa de corte libre y finalmente el repegado turbulento se lo conoce con el nombre de *burbuja de separación laminar* (Horton, 1967)

Las burbujas de separación laminar, las cuales fueron descritas en forma general, se dividen en burbujas largas y burbujas cortas. La distinción entre ambos tipos de burbujas está dada por la zona del perfil que comprenden y por su efecto sobre la distribución de presiones en la superficie del perfil (Tani, 1964).

En el caso de tener una burbuja de separación laminar corta la distribución de presiones se aproxima bastante a la que se obtendría si el fluido fuese invíscido (Gad-el-Hak, 1990) y la distorsión en las presiones que se introduce en la zona donde se presenta la burbuja propiamente dicha es mínima.

Por otro lado para el caso de tener una burbuja larga, la cual tiene una extensión aproximada entre el 20 y 30 % de la cuerda del perfil, se produce un cambio significativo en la distribución de presiones observada.

De esta manera la burbuja corta se presenta como un mecanismo que promueve la transición y, siempre y cuando se mantenga corta, no afecta la performance del perfil.

La burbuja de separación laminar provoca una mayor complejidad para definir estrategias de control debido a las relaciones entre: la transición, la separación, la fuerza de sustentación y la de arrastre.

Para controlar la separación así como también la localización de la transición de la capa límite se pueden utilizar métodos pasivos como el de moderar el gradiente de presiones adverso mediante modificaciones en la forma del cuerpo o generadores de vórtices (Kerho, 1993).

Entre otras técnicas para el control activo de la separación encontramos las de: inyección y succión de aire sin flujo neto (Amitay, 2001, Nishri, 1998, Greenblatt, 2000), superposición de la inyección de aire en forma estacionaria con la inyección periódica (Seifer, 1996, Seifer, 1993), excitación acústica (Zaman, 1987, Zaman 1992, Collins, 1975, Chang, 1992) perturbación del flujo con actuadores mecánicos (Hsiao, 1998, Seifer, 1998, Storms, 1994), entre otras.

En cuanto al control del escurrimiento en torno a perfiles alares con actuadores EHD, Vilela Mendes (1998) realizó un estudio numérico sobre el flujo alrededor de un perfil alar cuando se crea una capa de gas ionizado en la región de la capa límite. Con su modelo estimó la densidad de carga que se debe generar para producir cambios en la transición de la capa límite, la cual es aproximadamente de $15 \mu\text{C}/\text{cm}^3$

Yu. V. Shcherbakov et. al. (2000) estudiaron la reducción de la fuerza de arrastre experimentada por un perfil alar como consecuencia de la aplicación de una descarga corona (AC) en su superficie. El dispositivo es muy similar al empleado por Roth (1998) para placas planas basado en el uso de una descarga con electrodos separados por una barrera dieléctrica. Los resultados obtenidos sobre el perfil alar muestran una disminución de la fuerza de arrastre para el caso del flujo turbulento que van entre el 5,3 % y el 2,2 % para velocidades testeadas de 35 y 53,6 m/s respectivamente. Para el caso de flujo laminar la disminución en la fuerza de arrastre experimentada por el perfil como consecuencia de la aplicación de la descarga apenas se aprecia. Los autores asocian la reducción del drag en el caso laminar a una modificación producida en la viscosidad dinámica como consecuencia de la introducción de una capa de gas ionizado. Siendo dicha reducción muy pequeña debido al bajo grado de ionización del gas introducido (10^{15} iones/cm³). Para el caso de la reducción del drag en flujo turbulento los autores reconocen la existencia de mecanismos que aún no están del todo claros.

Johnson (2001) estudió la influencia que tiene la aplicación de una descarga superficial dentro de la capa límite desarrollada sobre un perfil alar. La descarga es una corona generalizada (*glow*) que se logra también por medio de un dispositivo similar al utilizado por Roth. En este trabajo se muestra que el plasma generado por la descarga promueve la transición de la capa límite de laminar a turbulenta. De esta manera se obtuvo incrementos en dos grados para la entrada en pérdida del perfil. EL autor mostró que es posible influir las características aerodinámicas globales del flujo cubriendo pequeñas áreas con el plasma, logrando por ejemplo un incremento del 2,5 % en el lift. No obstante la posición de los electrodos debe coincidir con el punto de separación, con una precisión de la décima de milímetro. A su vez notó que los efectos aerodinámicos obtenidos son mayores a medida que se aumenta la frecuencia de la fuente de alta tensión, hasta que para cierto valor de frecuencia se produce una saturación de dichos efectos.

En el presente trabajo se montaron dos electrodos desnudos en la superficie aislante de un perfil alar y se considera una descarga corona bipolar obtenida por una fuente de corriente continua.

Las descargas corona son descargas auto sostenidas caracterizadas por la fuerte inhomogeneidad del campo eléctrico y la presencia de electrodos con un radio de curvatura bajo. Esta configuración confina la ionización a las regiones cercanas a los electrodos de menor radio de curvatura donde el campo eléctrico es mayor. De manera que en este tipo de descargas se presentan: electrodos activos rodeados de una zona de ionización donde se generan las cargas libres, una región de "deriva" (donde la intensidad del campo eléctrico es baja y las partículas cargadas que se dirigen hacia los electrodos pasivos interactúan con el medio), y los electrodos pasivos. Las descargas corona pueden ser unipolares o bipolares dependiendo si uno o ambos electrodos son activos. Las descargas bipolares conducen a la formación de streamers. Pequeños filamentos de plasma conductor los cuales se extienden desde un electrodo llevando sus propias zonas de ionización en sus extremos.

El conocimiento del fenómeno involucrado en las descargas coronas que ocurren en las cercanías de cuerpos aislantes no fue tan ampliamente estudiado como si lo fueron las descargas coronas producidas sin la presencia de algún cuerpo extraño en su proximidad.

La inducción de flujo es usualmente conocida como electroconvección o viento iónico. La electroconvección ocurre si las fuerzas Coulombianas actuantes sobre las partículas del fluido son predominantes con relación a las fuerzas de polarización. Esto es usualmente así cuando el medio fluido es aire. La manera en que las fuerzas eléctricas actúan sobre las partículas fluidas se puede explicar considerando que los iones en su movimiento hacia el electrodo pasivo intercambian cantidad de movimiento con las partículas neutras del fluido (mediante sucesivas colisiones) induciendo de esta manera su movimiento.

Cuando las corrientes involucradas en el proceso son tan bajas que los efectos magnéticos pueden despreciarse el fenómeno es descrito por el conjunto de ecuaciones de los problemas de la electrohidrodinámica (EHD).

Resultados recientes (Artana, 1999, Desimone, 1999), muestran que con la configuración de electrodos adoptada en el presente trabajo se presenta un régimen de descarga similar al de glow corona en cuanto que en este régimen al igual que en el de la descarga corona "normal" desaparece la zona de deriva.

Desde el punto de vista tecnológico este actuador presenta ventajas en cuanto a la ausencia en el mismo de partes móviles. A su vez presenta un tiempo de respuesta muy corto (del orden de los nanosegundos) y un alto grado de eficiencia en la transformación de energía eléctrica en mecánica (D'Adamo, 2002).

Sin embargo a fin de obtener un actuador de aplicación práctica todavía es necesario alcanzar un mejor conocimiento de las características de la descarga bajo diferentes condiciones de funcionamiento para de esta manera operar el actuador con un mayor grado de control.

En un trabajo reciente Artana (2002) señala que el intercambio de cantidad de movimiento (vía colisión de partículas) no es el único mecanismo responsable de las modificaciones observadas en flujos externos en los cuales se emplearon actuadores EHD similares al utilizado en el presente trabajo. En dicho trabajo se presenta la hipótesis que la aplicación de la descarga además de la provocar la electroconvección introduce modificaciones en las propiedades del fluido cercano a la superficie del perfil que afectan el escurrimiento en forma global.

El objetivo de este trabajo es el de avanzar un poco más sobre el conocimiento de las características del actuador y de cómo la electroconvección y el cambio de las propiedades del fluido, cercano a la superficie del perfil, modifican el escurrimiento alrededor de dicho perfil. En particular sobre como afecta a la burbuja de separación laminar y la separación de la capa límite turbulenta producida aguas abajo de la misma.

2. Dispositivo experimental

2.1. Túnel de viento

Las visualizaciones sobre el escurrimiento fueron realizadas en un túnel de viento de baja velocidad (0-5 m/s, 0,45 x 0,45 m² de sección rectangular). Las medidas de presión y el relevamiento del campo de velocidades del escurrimiento fueron realizadas en un túnel de lazo cerrado en el cual se alcanzan velocidades mayores (1-30 m/s, 0,50 x 0,50 m² de sección rectangular).

El perfil fue montado en la cámara de prueba con su eje de giro horizontal y perpendicular a la dirección del flujo principal. En la sección de prueba la intensidad de la turbulencia es menor que el 0,5 % (5000Hz), encontrándose una mejor descripción de las características del túnel de viento en trabajos publicados previamente (Tensi, 2002).

2.2. Perfil alar

El perfil utilizado en el presente trabajo fue un NACA 0015.

En la Figura 1 se aprecian las dimensiones principales del perfil. El mismo fue construido en dos bloques separados de Polimetil Metacrilato (PMMA). Uno de los bloques fue ahuecado mientras que el otro bloque poseía una saliente a fin de lograr el encaje entre ambos.

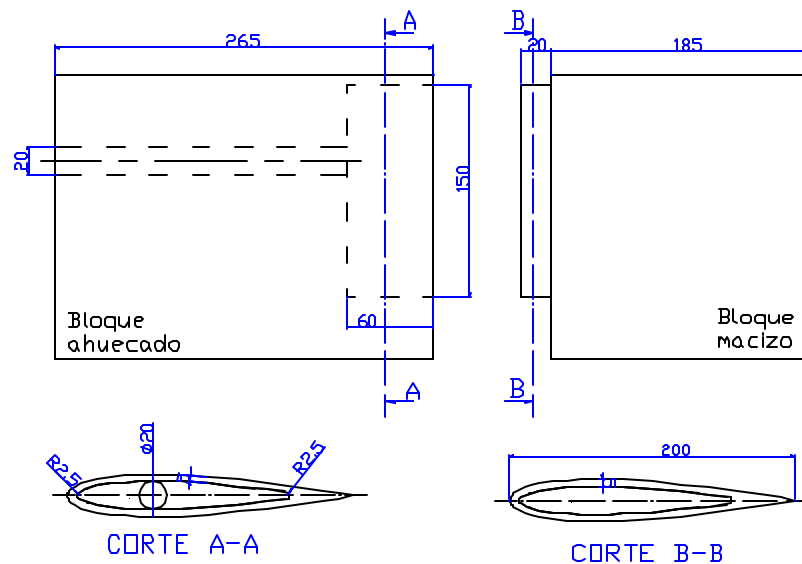


Fig. 1. Dimensiones principales del perfil utilizado (en mm).

En el bloque ahuecado se practicaron veinte orificios alineados en el intrados y otros once orificios, también alineados, en el extrados del perfil.

La ubicación de la línea normal al eje de giro del perfil sobre la cual fueron practicados dichos orificios pasa por el medio de la envergadura del perfil.

Por los orificios se pasaron micro tubos de Tygon, los cuales tenían un diámetro interno de 0,2 pulg. y un diámetro externo de 0,6 pulg. Estos microtubos fueron colocados de manera de quedar al ras de la superficie del perfil.

2.3. Dispositivo empleado para la visualización del escurrimiento

Para la visualización del escurrimiento alrededor del perfil alar, se utilizó un generador de humo a base de Kerosene. El filete de humo así generado ($\phi = 2,5$ mm) fue interceptado por un plano láser de manera de obtener una visualización más clara del mismo.

El plano láser de un espesor aproximado de 0.5 mm fue generado por un diodo láser de 5 mW. El láser fue colocado en el techo de la cámara de prueba. Las visualizaciones se llevaron a cabo para distintas alturas del filete de humo, así como también para distintas velocidades del aire en el túnel de viento y distintos ángulos de ataque del perfil, observándose en todos los casos el escurrimiento con y sin la aplicación del campo eléctrico. Las visualizaciones fueron registradas con una cámara de video digital Sony DCR-TRV230.

2.4. Dispositivo empleado para realizar las medidas de presión

Los microtubos fueron empleados para la medición de la presión estática en la superficie del perfil (p).

Se empleo un juego de 31 sensores independientes de estado sólido cuya señal de salida fue conectada a un sistema de adquisición de datos.

La velocidad de la corriente libre (U_0) fue medida mediante un tubo Pitot del tipo Prandtl (cabeza semiesférica) ubicado 0,5 m aguas arriba del perfil y conectado a un micromanómetro diferencial.

La distribución de presiones sobre la superficie del perfil fue adimensionalizada mediante el empleo de la presión dinámica de la corriente libre, definiéndose de esta manera el coeficiente de presión C_p como:

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{\rho U_0^2}{2}} \quad (1)$$

Donde p es la presión en la superficie del perfil y p_0 es la presión estática de la corriente libre.

2.5. Excitación EHD

Dos fuentes de alta tensión ajustables en forma independiente y de polaridad opuesta (+40kV, -40kV, 3,75mA) fueron empleadas para imponer la diferencia de tensión necesaria para lograr la descarga auto sostenida.

Se montaron dos electrodos sobre la superficie del perfil. El electrodo placa consiste en una hoja rectangular de papel de aluminio de (380 x 18 mm), la cual fue adherida a la superficie del perfil mediante la aplicación de una cinta doble faz. Como electrodo alambre se utilizó un alambre de cobre de 0,9 mm de diámetro, el mismo fue encastrado en una ranura que se practicó en la superficie del perfil.

En la Figura 2 se aprecia la ubicación de los electrodos sobre la superficie del perfil. El electrodo alambre fue conectado a la fuente positiva mientras que al electrodo placa se lo conecto a la fuente negativa

Aumentando la diferencia de tensión aplicada entre ambos electrodos se establecen distintos regímenes de descarga. Las medidas de corriente fueron realizadas mediante un circuito electrométrico que permite detectar corrientes de hasta 1nA.

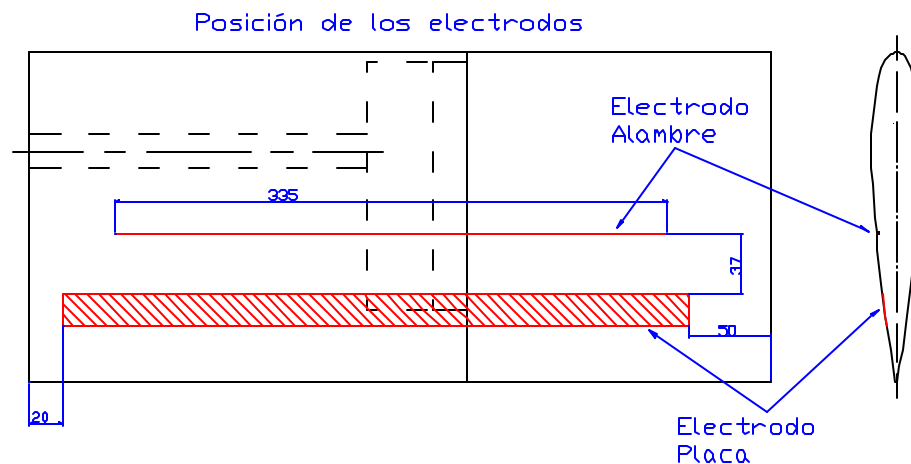


Figura 2. Ubicación de los electrodos sobre la superficie del perfil (distancias en mm).

2.6. Medición del campo de velocidades

El campo de velocidades fue medido mediante la técnica de P.I.V. (Particle Image Velocimetry)

Estas medidas fueron hechas utilizando el sistema DANTEC controlado por FlowMap@PIV. El dispositivo fue ajustado para obtener áreas de interrogación de 16 x 16 pixeles con una superposición de las mismas del 50%. Las partículas trazadoras fueron producidas mediante un generador de humos EI 514 Deltalab el cual emplea aceite puro de grado cosmético.

El sistema fue iluminado por un plano láser producido por un laser Yag de 200 mJ.

En nuestras experiencias cada pulso del láser tenía una duración de 0.01 micro segundos y el tiempo entre pulsos era de 10 micro segundos. Fue utilizada una cámara de progressive scan interline la cual podía generar imágenes de 768x484 pixeles. Se consideró para cada experimento 600 pares de imágenes digitales tomadas cada 0.1 segundo. Las imágenes fueron obtenidas con un factor de escala de 8.946.

La resolución para las distancias se puede estimar como el producto entre la resolución en pixeles (1/4 pix) y la dimensión del píxel (0.1 mm = 1 pix). Luego la resolución del campo de velocidades se obtiene de dividir este ultimo valor por el tiempo entre un par de pulsos. De esta manera se puede estimar la incertidumbre de una medida del campo de velocidades en nuestro caso:

$$\Delta v = \frac{1}{4} \text{pix} \cdot \frac{0.1 \cdot \text{mm}}{\text{pix}} \cdot \frac{1}{10\mu\text{s}} \cong 2.5 \text{ m/s} \quad (2)$$

El valor obtenido de esta manera resulta en general ser muy conservador.

Cada campo de velocidades fue depurado mediante la aplicación de dos filtros: El filtro de validación del pico máximo y el de validación del rango.

La validación del pico máximo (peak validation) esta basada en un criterio de detectabilidad (Keane, 1992). Mediante este filtro se validan los vectores que tienen una relación entre el pico mayor y el segundo pico (en el plano de la correlación) mayor que un valor fijado (1,2 para nuestro caso).

El filtro de validación del rango (range validation) permite establecer un rango para el módulo de la velocidad de los vectores. En nuestro caso se consideró un rango máximo admisible para el módulo de la velocidad igual a 2,5 veces la velocidad de la corriente libre del flujo.

Luego de llevar a cabo dichos procesos de filtrado del campo de vectores calculado originalmente por el sistema se removió aproximadamente el 5% a 10% del total de los 5605 vectores iniciales

3. Resultados

3.1. Visualización del escurrimiento

En la Figura 3 se muestra una visualización del escurrimiento que se produce a 1 m/s y un ángulo de ataque de 5,9°. En la primer imagen la descarga aun no a sido aplicada, mientras que en la segunda imagen se encuentra la descarga actuando sobre el escurrimiento.

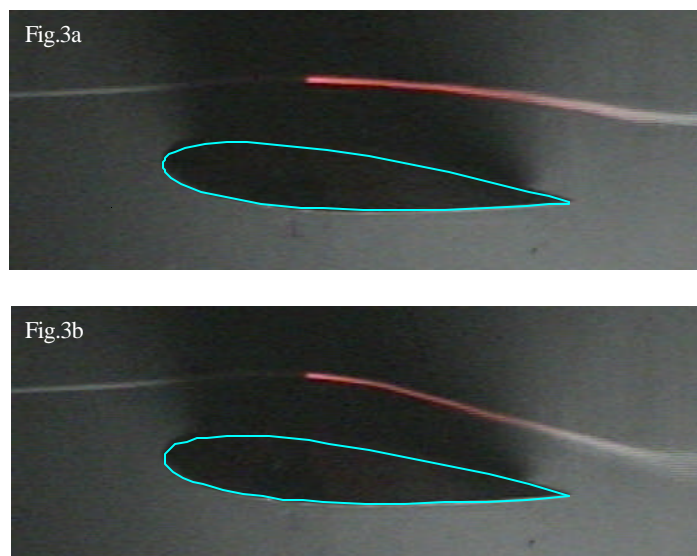


Figura 3. Visualización del escurrimiento (1 m/s, 5,9°). (a) Sin descarga, (b) Con descarga

Para el régimen analizado mediante las visualizaciones ($Re \approx 15.000$) el flujo es completamente laminar. En estas condiciones la capa límite laminar se separa de la superficie del perfil y no se produce el repegado del flujo aguas abajo del punto de separación laminar.

Comparando las Fig. (3a) y (3b) se puede apreciar un marcado descenso del filete de humo una vez aplicada la descarga. El comportamiento observado en la Fig. (3) estaría indicando un corrimiento aguas abajo en el punto donde se produce la separación laminar como consecuencia de la aplicación de la descarga.

3.2. Distribución de presiones en la superficie

Para todas las curvas presentadas en este punto valen las siguientes consideraciones.

En el eje vertical se representa el coeficiente de presión adimensionalizado (C_p) definido por la Ec. (1). En el eje horizontal se muestra la coordenada x sobre la cuerda del perfil adimensionalizada con la misma (x/C). La línea representada en azul es la solución potencial para el escurrimiento planteado.

Las líneas verticales representan la ubicación de los electrodos, siendo la de color verde la indicativa de la ubicación del electrodo alambre y las líneas de color magenta representan la extensión del electrodo placa.

En la Figuras 4a-4c se presenta la distribución de presiones obtenida en la superficie del perfil para un ángulo de ataque de 15° . Para las tres velocidades consideradas (7,5 12,5 y 17,5 m/s respectivamente) se observa en la superficie superior del perfil una zona de presión constante, cercana al borde de ataque, la cual indica la presencia de la burbuja de separación laminar corta, de acuerdo al criterio ya expuesto.

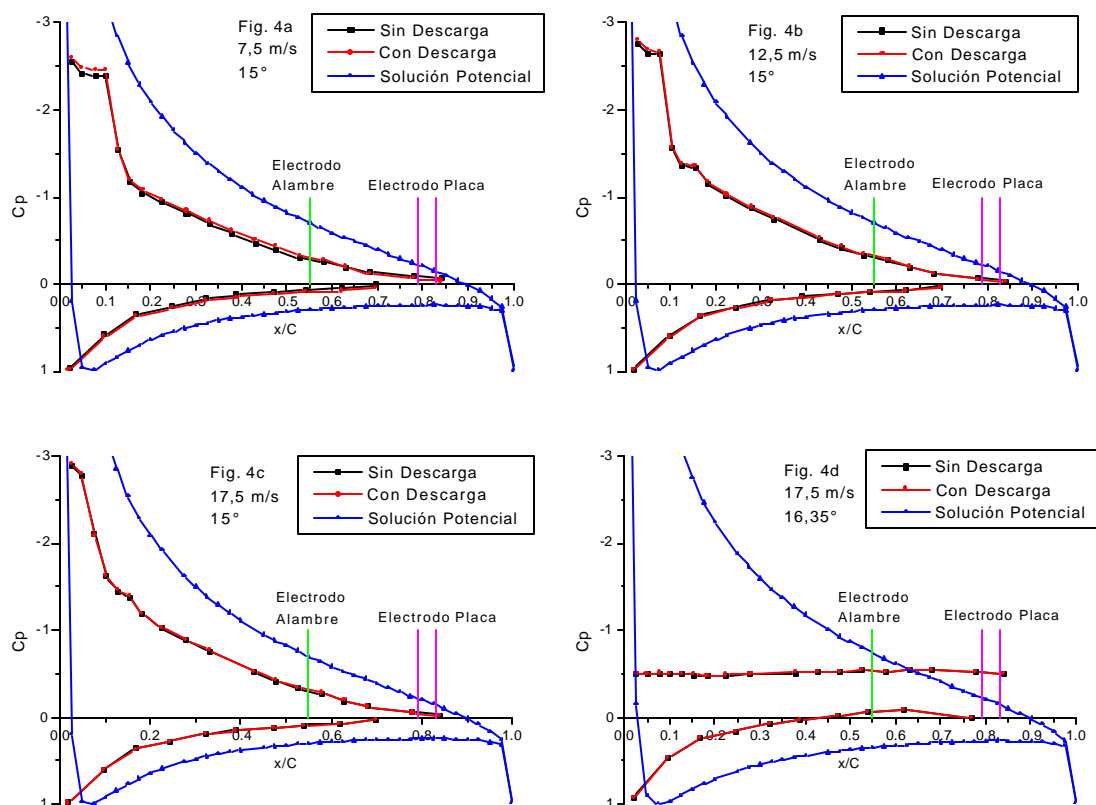


Figura 4. Distribución de presiones sobre la superficie del perfil, (a) 15° , $Re = 10^5$; (b) 15° , $Re = 1,66 \cdot 10^5$; (c) 15° , $Re = 2,3 \cdot 10^5$; (d) $16,35^\circ$, $Re = 2,3 \cdot 10^5$

A medida que se aumenta la velocidad dicha meseta en la distribución de presiones disminuye su extensión y se alcanza en módulo un pico máximo de presión. Este comportamiento ya fue observado en trabajos experimentales previos por otros investigadores (O'Meara, 1987).

A su vez en los tres primeros gráficos de la Fig. (4) la distribución de presiones en el intrados presentaría una nueva meseta para $x/C > 0,80$ lo cual indicaría la separación de la capa límite turbulenta, esto último no puede ser totalmente confirmado por las medidas de presión debido a la ausencia de tomas para dicha zona. Mejores conclusiones al respecto se obtendrán con el análisis del campo de velocidades.

En la Figura 4d se presenta la distribución de presiones para un ángulo de ataque de $16,35$ grados y una velocidad de $17,5$ m/s. En la misma, la región de presión constante (con un valor relativamente inferior al valor máximo alcanzado en los tres casos anteriores) abarca toda la superficie superior del perfil indicando que para dicho ángulo se produce la

separación de la capa límite laminar sin posterior repegado del flujo a la superficie del perfil. Éste fenómeno es conocido como bubble bursting (Lissaman, 1983).

Respecto de la acción del actuador analizando las Fig. (4a)-(4c), se puede observar que para 7,5 m/s las presiones en el intrados son levemente más negativas cuando se aplica la descarga, mientras que las presiones en el extrados son levemente más positivas bajo la misma condición. El mismo comportamiento presentado por las presiones en el intrados para 7,5 m/s, se observa para 12,5 y 17,5 m/s aunque la disminución de la presión es menor cuanto mayor es la velocidad. Las presiones en el intrados no presentan modificaciones apreciables para las velocidades mayores a 7,5 m/s.

En la Figura 4d se aprecia que la aplicación de la descarga no produce un efecto apreciable sobre la distribución de presiones del perfil.

3.3. Campo de velocidades

Los resultados mostrados en este punto corresponden a un escurrimiento realizado a 17,5 m/s para un ángulo de ataque del perfil de 15°.

En la Figura 5 se observan el campo de velocidades del escurrimiento. La Fig. (5a) corresponde al escurrimiento sin la aplicación de la descarga mientras que en la Fig. (5b) la corriente que circuló por el circuito eléctrico de la descarga fue de 200 μ A, y para la Fig. (5c) la corriente observada fue de 420 μ A.

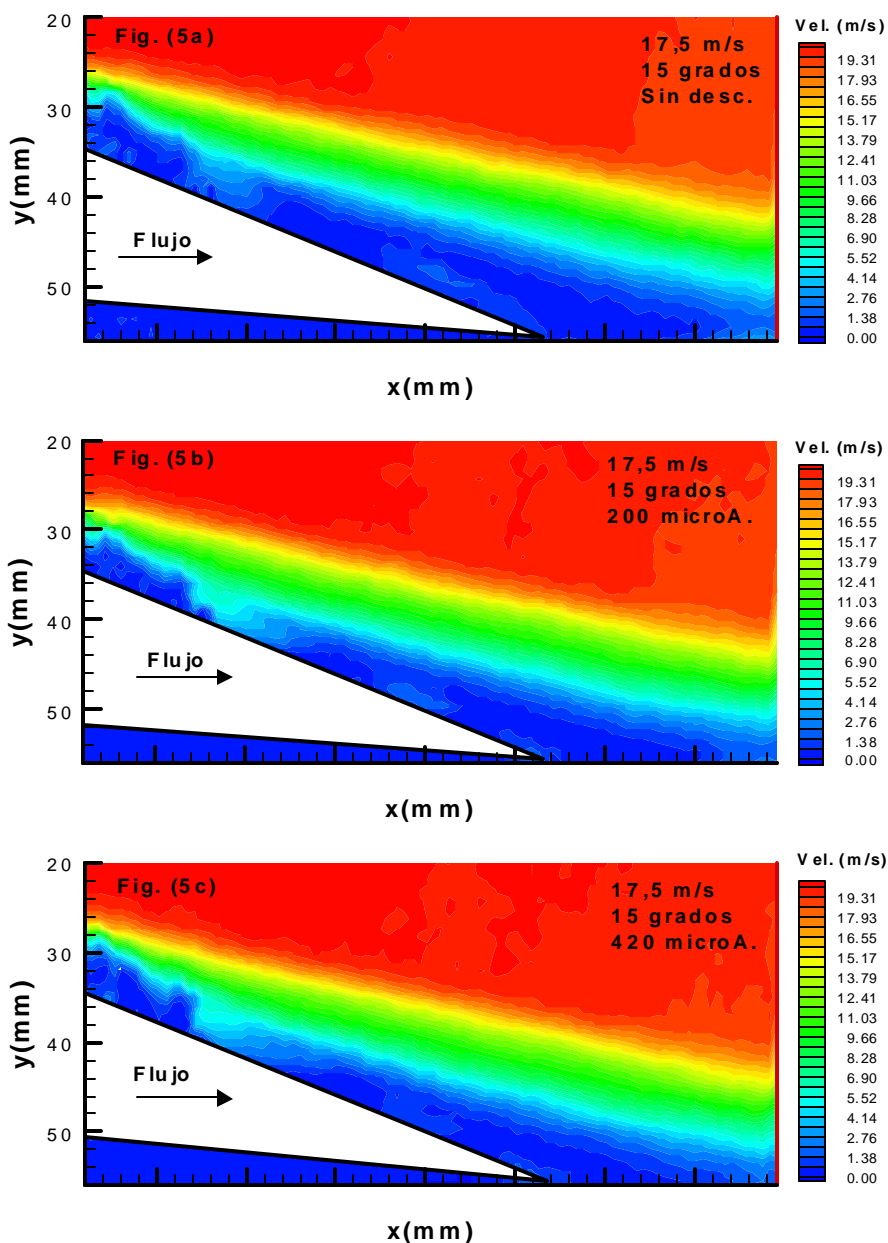


Figura 5. Campo de velocidad del flujo (17,5 m/s, 15°). (5a) Sin descarga (0 μ A), (5b) 200 μ A, (5c) 420 μ A.

Las Figuras 5 nos permiten observar que existe una región cercana a la superficie del perfil de importante dimensión comparada con el espesor de la capa límite donde la velocidad es prácticamente nula. Con esta observación corroboramos la suposición de que la capa límite turbulenta desarrollada aguas abajo de la burbuja de separación laminar se desprendió de la superficie del perfil. Comparando las Figs (5b) y (5c) con la Fig. (5a) se puede apreciar que la aplicación de la descarga produce ligeras modificaciones en las dimensiones de estas zonas observándose una leve disminución de la misma.

En la Figura 6 se presenta la diferencia del campo de velocidades entre el escurrimiento con la descarga funcionando y el escurrimiento sin la descarga. En la Fig. (6a) la corriente que circuló por el circuito eléctrico de la descarga fue de $200\mu\text{A}$, mientras que para las Fig. (6b) la corriente observada fue de $420\mu\text{A}$.

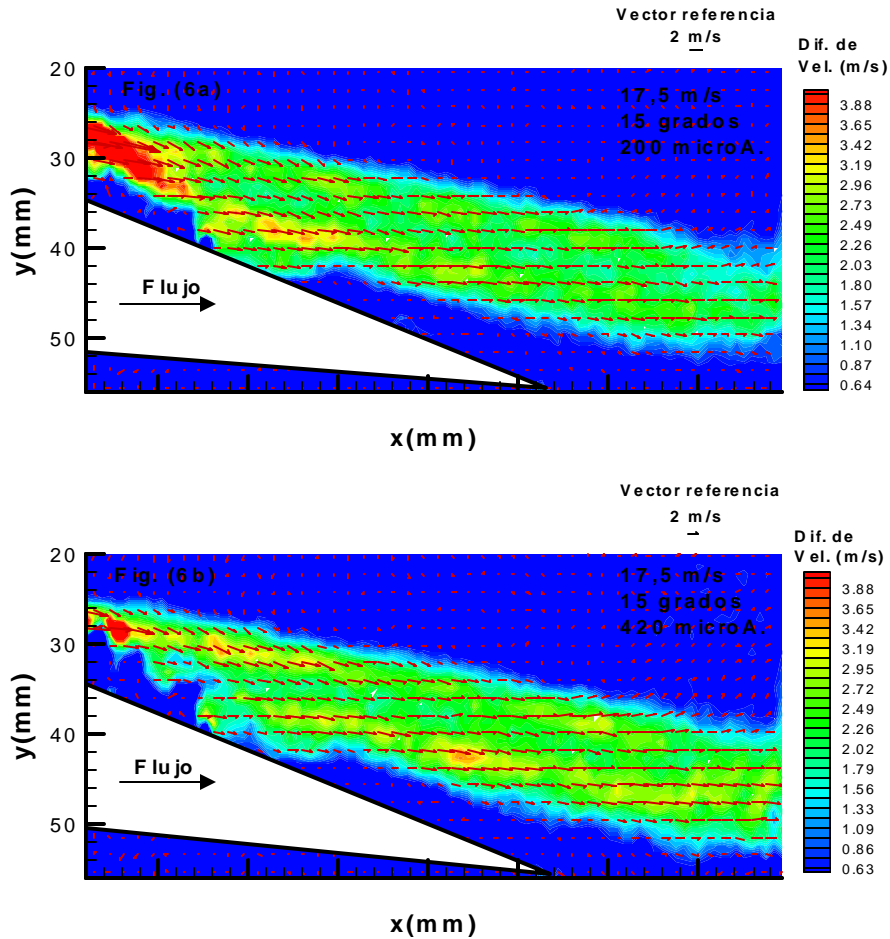


Figura 6. Diferencia del campo de velocidad entre el flujo con y sin descarga ($17,5 \text{ m/s}$, 15°). (6a) $200\mu\text{A}$ y (6b) $420\mu\text{A}$.

El aumento en la velocidad media del escurrimiento en la región cercana a la pared puesto de manifiesto en la Fig. (6) permite corroborar el leve acercamiento del flujo hacia la superficie del perfil anteriormente mencionado.

En la Figura 7 se presenta el campo de vorticidad del escurrimiento. La Fig. (7a) corresponde al escurrimiento sin la aplicación de la descarga mientras que en la Fig. (7b) la corriente que circuló por el circuito eléctrico de la descarga fue de $200\mu\text{A}$, y para la Fig. (7c) la corriente observada fue de $420\mu\text{A}$.

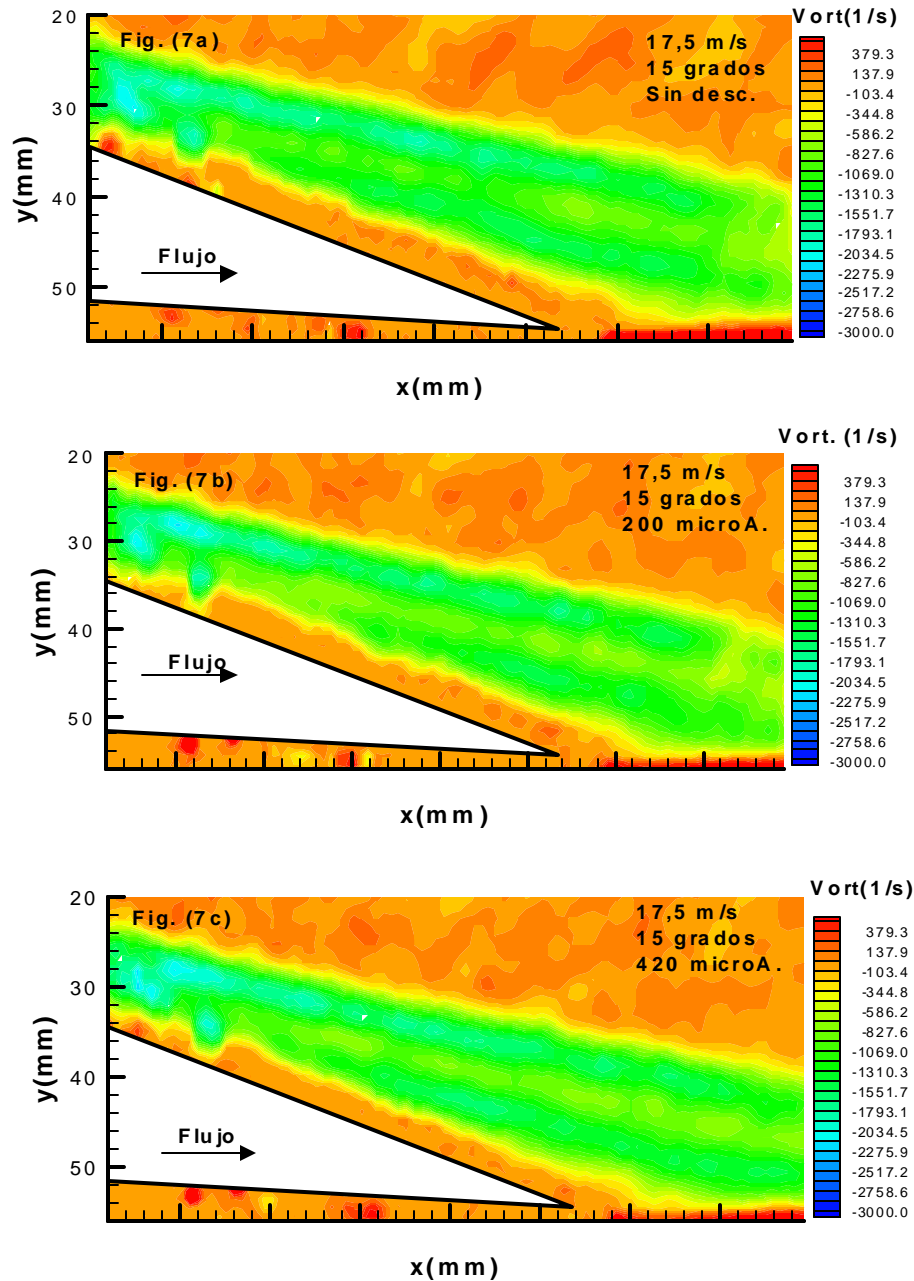


Figura 7. Campo de vorticidad (17,5 m/s, 15°). (7a) Sin descarga, (7b) 200 μ A y (7c) 420 μ A.

La Figura 7 permite mostrar la existencia de una región donde aparece una fuerte vorticidad media con respecto al resto del escurrimiento. Dicha zona no presenta diferencias notables para el escurrimiento con y sin actuador aplicado.

De acuerdo a lo observado en las Figs. (6b) y (6c) y considerando las Figs. (7b) y (7c) se aprecia que la región donde se produce el citado aumento en la velocidad media del escurrimiento se corresponde sensiblemente con la región donde se encuentra la concentración de vorticidad media del flujo.

4. Conclusiones

En este trabajo analizamos el escurrimiento alrededor de un perfil alar a bajos números de Reynolds considerando casos a muy baja velocidad donde ocurre una separación laminar de la capa límite y casos donde la velocidad es más elevada y permite la formación de la burbuja de separación laminar.

Las imágenes obtenidas del escurrimiento nos permitieron observar que para el primer caso se produce un corrimiento en el punto de separación laminar como consecuencia de la aplicación del actuador.

A número de Reynolds más elevados los ensayos de presión indican que como consecuencia de la aplicación de la descarga las distribuciones de presiones superficial son muy ligeramente modificadas. Las diferencias se reducen conforme se aumenta la velocidad del flujo y no se logra inferir cambios notables tanto en la posición como en la longitud de la burbuja de separación laminar.

Los datos obtenidos con la técnica de PIV, permite analizar los efectos sobre el escurrimiento en posiciones cercanas al borde de fuga del perfil. Nos interesamos por los efectos sobre la capa de corte libre que surge como consecuencia de la separación de la capa límite turbulenta aguas abajo de la burbuja de separación laminar.

El efecto de la aplicación del actuador resulta en un leve repegado del escurrimiento. A su vez se produce un aumento en la velocidad media dentro de una región donde se concentra la vorticidad media del escurrimiento. De esta manera la aplicación de la descarga provoca un aumento en el transporte convectivo de la vorticidad media del flujo.

5. Referencias

- Amitay M., Smith D. R., Kibens V., Parekh D., Glezer A., 2001, "Aerodynamic Flow Control over an Unconventional Airfoil Using Synthetic Jet Actuators", *AIAA Journal*, Vol.39, No.3, pp.361-370.
- Artana G., Desimone G., Touchard G., 1999, "Study of the Changes in the Flow Around a Cylinder Caused by Electroconvection", *Electrostatics'99*, IOP Publ. Ltd, Bristol-Philadelphia, pp. 147-152.
- Artana G., Sosa R., Moreau E., Touchard G., 2002, "Control of the near wake flow around a circular cylinder with electrohydrodynamic actuators", sometido a referato para su publicación en *Physics of Fluids*.
- Chang R. C., Hsiao F. B., Shyu R. N., 1992, "Forcing Level Effects of Internal Acoustic Excitation on the Improvement of Airfoil Performance", *Journal of Aircraft*, Vol.29, No.5, pp.823-829.
- Collins F. G., Zelenevitz J., 1975, "Influence of Sound upon Separated Flows over Wings", *AIAA Journal*, Vol.13, No.3, pp.408-410.
- D'Adamo J., Artana G., Moreau E., Touchard G., 2002, "Control of the airflow close to a flat plate with electrohydrodynamic actuators", ASME FEDSM'02 paper 2002-31041, Flow instabilities and control forum, Montreal, Quebec, Canada.
- Desimone G., DiPrimio G., Artana G., 1999, "Modification of the Flow Around a Cylinder by Means of Electrodes Placed on its Surface", *Proc. Colloque de la Société Française d'Electrostatique*, Poitiers, pp. 80-84.
- Gad-el-Hak Mohamed, 1990, *Control of Low-Speed Airfoil Aerodynamics*", *AIAA Journal*, Vol.28, No.9, pp. 1537-1552.
- Greenblatt D., Wygnanski I. J., 2000, "Use of Periodic Excitation to Enhance Airfoil Performance at Low Reynolds Numbers", *J. Aircraft*, Vol.38, No.1, pp.190-192.
- Horton H. P., 1967, "Semi- Empirical Theory for the Growth and Bursting of Laminar Separation Bubbles", *Aeronautical Research Council Current Papers*, CP 1073, Univ. of London.
- Hsiao F. B., Liang P. F., Huan C. Y., 1998, "High-Incidence Airfoil Aerodynamics Improvement by Leading-Edge Oscillating Flap", *J. Aircraft*, Vol.35, No.3, pp.508-510.
- Johnson G. A., Scott S. J., 2001, "Plasma-Aerodynamic Boundary Layer Interaction Studies", *AIAA paper 2001-3052*, 32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Anaheim, CA.
- Keane R., R. Adrian, 1992, "Theory of Cross Correlation Analysis of PIV Images", *Applied Scientific Research* 49, pp.191-215.
- Kerho M., Hutcherson S., Blackwelder, Liebeck R. H., 1993, "Vortex Generators Used to Control Laminar Separation Bubbles", *Journal of Aircraft*, Vol.30, No.3, pp.315-319.
- Lissaman P. B. S., 1983, "Low-Reynolds Number Airfoils", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.15, pp.223-239.
- Nishri B., Wygnanski I., 1998, "Effects of Periodic Excitation on Turbulent Flow Separation from a Flap", *AIAA Journal*, Vol.36, No.4, pp.547-556.
- O'Meara M. M., y T. J. Mueller, 1987, "Laminar Separation Bubble Characteristics on an Airfoil at Low Reynolds Numbers", *AIAA Journal*, Vol.25, No.8, pp. 1033-1041.
- Roth J. R., Sherman D. M., Wilkinson S. P., 1998, "Boundary Layer Flow Control with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma", *AIAA paper 98-0328*, 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV.
- Schlichting H., 1979, *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill.
- Seifer A., Bachar T., Koss D., Shepshelovich M., Wygnanski I., 1993, "Oscillatory Blowing: A Tool to Delay Boundary-Layer Separation", *AIAA Journal*, Vol.31, No.11, pp.2052-2060.
- Seifer A., Darabi A., Wygnanski I., 1996, "Delay of Airfoil Stall by Periodic Excitation", *Journal of Aircraft*, Vol.33, No.4, pp.691-698.
- Seifer A., Eliahu S., Greenblatt D., 1998, "Use of Piezoelectric Actuators for Airfoil Separation Control", *AIAA Journal*, Vol.36, No.8, pp.1535-1537.
- Shcherbakov Yu V., Ivanov N. S., Baryshev N. D., Frolovskij V. S., Syssoev V. S., 2000, "Drag Reduction by AC Streamer Corona Discharges along a Wing-like Profile Plate", *AIAA paper 2000-2670*, 31st AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Denver, CO.
- Storms B., Jang C., 1994, "Lift Enhancement of an Airfoil Using a Gurney Flap and Vortex Generators", *Journal of Aircraft*, Vol.31, No.3, pp.542-547.
- Tani, I., 1964, "Low Speed Flows Involving Bubble Separations", *Progress in Aeronautical Science*, Pergamon Press, pp. 70-103.

- Tensi J., Boué I., Paillé F., G. Dury, 2002, "Modification of the Wake behind a Circular Cylinder by Using Synthetic Jets", Journal of Visualization 5 N° 1, The Visualization Society of Japan.
- Vilela Mendes R., Dente J. A., 1998, "Boundary-Layer Control by Electric Fields", Journal of Fluids Engineering, Vol.120, pp.626-629.
- Zaman K. B. M. Q., Bar-Server A., Mangalam S. M., 1987, "Effect of a acoustic excitation on the flow over a low-Re airfoil", J. Fluid Mech., Vol.182, pp. 127-148.
- Zaman K. B. M. Q., 1992, "Effect of Acoustic Excitation on Stalled Flows over an Airfoil", AIAA Journal, Vol.30, No.6, pp.1492-1499.

Abstract. *In this work we try to analyze the effects produced by an EHD actuator operated in steady state on the flow around an airfoil at low Re numbers (10^4 - 10^5).*
This analysis was made studying the experimental results which was taken from different techniques: the flow visualization with smoke injection, PIV images and airfoil surface pressure measurements.
The pressure measurements shows the existence of a laminar separation bubble near the airfoil leading edge, which produce the transition of the boundary layer from laminar to turbulent.
In the studied condition we have been able to observe an increase of the mean speed in a region where the mean vorticity concentrate

Keywords: *Airfoil, Laminar Separation Bubble, EHD, PIV.*