

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE OCHO PERFILES AERODINÁMICOS SERIE SZ-1500 PARA BAJOS NÚMEROS DE REYNOLDS

STEFAN ZAREA¹, IGNACIO IRAUSQUÍN², EDUARDO LEAÑEZ³

¹ Universidad Simón Bolívar, Opto. de Conversión y Transporte de Energía. Caracas 1080, Venezuela.

² Universidad Simón Bolívar, Sede del Litoral, Dpto. de Tecnología Industrial. Caracas 1080, Venezuela.

³ IUPFAN (UNEFA), Núcleo Maracay, Venezuela.

Recibido: Marzo de 2002

Recibido en forma final revisado: Septiembre de 2002

RESUMEN

En este trabajo se presentan las curvas características experimentales de ocho nuevos perfiles Zarea de la serie SZ-1500. Estos perfiles han sido trazados con el método paramétrico modificado, que consiste en la obtención de un nuevo perfil combinando el intradós de un perfil existente con el extradós de otro perfil de la misma clase o de una familia distinta. Todos los perfiles considerados para tal combinación tienen curvas características experimentales conocidas. Mediante una balanza de tres componentes se han efectuado las mediciones necesarias en un túnel de viento subsónico para el cálculo de los coeficientes de sustentación, de arrastre, de momento aerodinámico y de la fineza aerodinámica, que permitieron el trazado de las curvas características de los perfiles estudiados. Los perfiles trazados se caracterizan por un espesor máximo relativamente alto y flecha del esqueleto pequeña. Los coeficientes aerodinámicos varían directamente proporcional al espesor máximo de los perfiles. El coeficiente de sustentación varía directamente proporcional al número de Reynolds, como en el caso de $Re > 10^6$. El mejor perfil resultó ser el SZ-1561, que alcanzó un coeficiente de sustentación de 1,4 a un ángulo de ataque elevado (18°), para $Re = 315099$. El coeficiente de arrastre, para siete de los perfiles, varía directamente proporcional con el número de Reynolds, contrario a lo que ocurre para $Re > 10^6$. Los resultados obtenidos ponen en evidencia que los nuevos perfiles tienen un buen comportamiento aerodinámico en comparación con los perfiles que sirvieron para su trazado. Las curvas características trazadas ofrecen la información requerida para la utilización de los perfiles estudiados en aplicaciones concretas y convalidan el método de trazado utilizado.

Palabras clave: Perfiles aerodinámicos, método paramétrico modificado, curvas características, ensayo experimental, bajos números de Reynolds

EXPERIMENTAL EVALUATION OF EIGHT SZ-1500 SERIES AIRFOILS FOR LOW REYNOLDS NUMBERS

ABSTRACT

This work presents the experimental characteristic curves of eight new Zarea airfoils of the SZ-1500 series. These airfoils have been traced with the modified-parametric method, which consists of the generation of a new airfoil combining the lower side of an existing airfoil with the upper side of another airfoil of the same family or a different one. All the airfoils considered for such a combination have experimental previously known characteristic curves. By means of a three-component balance, corresponding measurements were performed in a subsonic wind tunnel in order to calculate the lift, drag, moment and fineness coefficients, which allowed the trace of the characteristic curves for the studied airfoils. Traced airfoils are distinguished by a relatively high maximum thickness and small camber. The aerodynamic coefficients are proportional to the maximum thickness of the airfoils. The lift coefficient varies proportionally to the Reynolds number, such as in the case of $Re > 10^6$. The SZ-1561 was the best airfoil, reaching a lift coefficient of 1,4 at high angle of attack (18°), for $Re = 315099$. For seven airfoils the drag coefficient varies proportionally to the Reynolds number, the opposite of what happens for $Re > 10^6$. The results show that recent airfoils have a good aerodynamic behavior in comparison with the airfoils used in their generation. Resulting characteristic curves offer the information required for the use of the studied airfoils in specific applications and ratify the method of tracing employed.

Keywords: Airfoils, modified-parametric method, characteristic curves, experimental testing, low Reynolds numbers

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------------------|--|
| b | Envergadura de ala |
| b' | Juego entre cada borde del ala y la pared de la zona de ensayo |
| b'/b | Juego relativo de las alas en ensayo del túnel |
| c | Cuerda geométrica del perfil |
| b/c | Envergadura adimensional del ala |
| C_D | Coefficiente de resistencia aerodinámica |
| C_L | Coefficiente de sustentación |
| C_L/C_D | Fineza aerodinámica |
| $(C_L/C_D)_{máx}$ | Fineza aerodinámica máxima |
| $(C_L/C_D)_{\alpha_{CLmáx}}$ | Fineza aerodinámica correspondiente a ángulo $\alpha_{CLmáx}$ |
| C_M | Coefficiente de momento aerodinámico |
| D | Fuerza de arrastre |
| E_T | Error total en la determinación de los coeficientes aerodinámicos |
| $f_{máx}$ | Flecha máxima relativa del perfil |
| k | Rugosidad media absoluta |
| L | Fuerza de sustentación |
| M | Momento aerodinámico |
| P_{atm} | Presión atmosférica |
| P_v | Presión parcial del vapor de agua |
| P_w | Presión de saturación a la temperatura de bulbo húmedo |
| Re | Número de Reynolds |
| S | Superficie del ala |
| Tbh | Temperatura de bulbo húmedo |
| Tbs | Temperatura de bulbo seco |
| V_0 | Velocidad de la corriente perturbada en la sección de ensayo del túnel |
| w | Humedad específica |
| $x_{\delta máx}$ | Abscisa adimensional del espesor máximo |
| $x_{f máx}$ | Abscisa adimensional de la flecha máxima |
| x_l | Abscisas adimensionales del intradós |
| x_u | Abscisas adimensionales del extradós |
| y_l | Ordenadas adimensionales del intradós |
| y_u | Ordenadas adimensionales del extradós |
| α | Ángulo de ataque |
| $\alpha_{CLmáx}$ | Ángulo de ataque para el cual se obtiene el coeficiente de sustentación máximo |
| $\alpha_{(CL/CD)máx}$ | Ángulo de ataque para el cual se obtiene la fineza aerodinámica máxima |
| $\Delta C_L/\Delta\alpha$ | Pendiente de la curva C_L vs. α |
| $\delta_{máx}$ | Espesor máximo relativo del perfil |

| | |
|------------|----------------------|
| $\zeta(x)$ | Esqueleto del perfil |
| v | Volumen específico |
| ρ | Densidad del aire |

INTRODUCCIÓN

El flujo alrededor de perfiles aerodinámicos, la determinación de la distribución de velocidad y presión sobre los mismos y el trazado de las curvas características han constituido el objeto de un gran número de investigaciones experimentales, teóricas y/o computacionales [Abbott y Von Doenhoff, 1959; Anderson, 1991; Carafoli y Constantinescu, 1981]. La mayoría de los estudios realizados, sobre todo experimentales, se refieren a regímenes de flujo con número de Reynolds iguales o mayores a un millón. Experimentalmente se ha demostrado que las curvas características de los perfiles aerodinámicos para $Re < 10^5$ son bastante diferentes de las que corresponden a $Re > 10^6$ [Jacobs y Sherman, 1937; McMasters y Henderson, 1979; Shigeru *et al.*, 1997]. En ciertas aplicaciones, como por ejemplo turbinas eólicas de pequeña y mediana potencia, las aspas operan con flujos caracterizados por números de Reynolds entre $2 \cdot 10^5$ y $9 \cdot 10^5$, aproximadamente. Para este rango del número de Reynolds existe escasa información experimental referente a las curvas características de un número relativamente reducido de perfiles [Sheldahl y Blackwell, 1976; Snyder, 1981; Miley, 1982; Michos *et al.*, 1983; Tangler y Somers, 1995; Tangler y Somers, 1999]. Tanto en estos trabajos como en otros de la misma naturaleza, que no han sido citados en este artículo, se estudiaron:

- Perfiles clásicos, básicamente NACA, en su versión original.
- Perfiles clásicos con ciertas modificaciones de la geometría inicial.
- Nuevos perfiles diseñados para regímenes de flujos con bajos números de Reynolds.
- Variantes de los nuevos perfiles obtenidas modificando el borde de: ataque, el espesor máximo, la flecha máxima y/o el intradós.

En la mayoría de los casos los nuevos perfiles son tratados como perfiles de contorno dado, sin explicación sobre el procedimiento que ha sido empleado para su trazado. La meta de estas investigaciones se refiere al establecimiento de las características aerodinámicas de los perfiles estudiados.

Es bien sabido que los perfiles aerodinámicos pueden ser trazados por uno de los siguientes procedimientos [Zarea, 1970, 1995]: a) empírico, b) paramétrico, c) utilizando una transformación conforme, d) combinando una distribución

conveniente de singularidades hidrodinámicas y una corriente de traslación, e) utilizando ecuaciones integrales, f) especiales.

Los perfiles NACA y Gottingen han sido trazados utilizando los primeros dos métodos arriba mencionados [Riegels, 1961]. El método empírico consiste en trazar un contorno de referencia parecido a un perfil aerodinámico y establecer la forma definitiva mediante un procedimiento de optimización por ensayo y error, evaluando experimentalmente en un túnel de viento un ala que tiene como curva directriz el contorno seleccionado. El método paramétrico permite el trazado de perfiles aerodinámicos escogiendo un arco de curva como esqueleto y una ley de variación del espesor a lo largo de la cuerda [Abbott y Von Doenhoff; 1959].

El objetivo del presente estudio consiste en ofrecer curvas características, para bajos números de Reynolds, de ocho nuevos perfiles de pequeña curvatura ($f_{m\acute{a}x}$: 0,7%-4%) y de espesor máximo moderado hasta relativamente grande ($\delta_{m\acute{a}x}$ 11%- 20%), denominados de la serie SZ-1500, y el sencillo procedimiento empleado para su trazado.

La motivación para hacer este estudio radica en la necesidad de evaluar experimentalmente la nueva clase de perfiles generados con el método ideado por S. Zarea y que han sido designados como “perfiles Zarea”, para señalar la autoría del procedimiento, tal como es costumbre en la literatura de especialidad, por ejemplo con los perfiles Joukowski, Carafoli, Numachi, Eppler, etc.

Los perfiles estudiados y referenciados en este trabajo han sido trazados con el método paramétrico modificado [Zarea, 1970, 1980] que se describe más adelante. En base a cada uno de los perfiles considerados se han construido ocho alas de madera (cedro) con la cuerda de 150 mm y la envergadura de 450 mm. Los ensayos experimentales se han realizado en un túnel de viento (TE 44/A de Plint & Partners Ltd.) de circuito abierto que permite utilizar una velocidad máxima de 35 m/seg de la corriente de aire. La medición de la fuerza de sustentación (L), arrastre (D) y momento aerodinámico (M) se efectuaron con la balanza de tres componentes TE 81/A, que representa un accesorio del túnel de viento, asegurando una precisión de medición satisfactoria. Durante los ensayos se midieron la presión atmosférica y la temperatura de la corriente de aire, lo que permitió calcular la densidad del aire y el número de Reynolds del flujo. También se determinó la rugosidad (k) de la superficie de cada uno de los perfiles. Los resultados experimentales han sido procesados y por cada perfil se trazaron tres gráficas para los dos números de Reynolds correspondientes a las condiciones de ensayo. Los perfiles

estudiados tienen un buen comportamiento aerodinámico.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS PERFILES ESTUDIADOS

Trazado de los perfiles

El trazado de los perfiles aerodinámicos implica el conocimiento de la ecuación del contorno o de las coordenadas de un número suficiente de puntos (25 a 100) del mismo.

En el caso de los perfiles de contorno dado, como es el caso de los perfiles de la clase NACA, Gottingen, RAF, Clark Y, FX, FXL FXS, etc., la geometría de cada perfil está definida por una tabla de coordenadas adimensionales de suficientes puntos del intradós y el extradós [Riegels, 1961] para asegurar el trazado con buena precisión.

Los perfiles evaluados experimentalmente y presentados en este trabajo son perfiles de contorno dado obtenidos mediante un procedimiento ideado por S. Zarea y denominado como el *método paramétrico modificado* [Zarea, 1970, 1980]. Este método consiste en obtener un nuevo perfil combinando el intradós de un perfil **A** existente con el extradós de otro perfil **B** existente (Figura 1), para los cuales se conocen las curvas características experimentales o computacionales. Los perfiles **A** y **B** pueden pertenecer a la misma clase o a clases distintas. El conocimiento previo de las curvas características de los perfiles **A** y **B** es necesario, tanto para seleccionar perfiles aerodinámicos eficientes como para la comparación con las curvas características de los perfiles **C** (Figura 1) resultantes de la combinación y así determinar cuáles de los nuevos perfiles son mejores que los perfiles base.

Se han seleccionado perfiles NACA de cuatro y cinco dígitos y perfiles de las clases FX y FXL como base, y, aplicando el método paramétrico modificado, se han trazado cien nuevos perfiles denominados como perfiles Zarea serie 1500, identificados con números consecutivos de cuatro dígitos desde SZ-1500 hasta SZ-1599 [Irausquin y Leafiez, 1997]. El número de la serie (primeros dos dígitos) corresponde al número del equipo que realizó trazado y estudio de perfiles con el método paramétrico modificado, que en este caso fue el grupo número 15. Los últimos dos dígitos permiten identificar cada uno de los cien perfiles trazado por un determinado grupo de estudio.

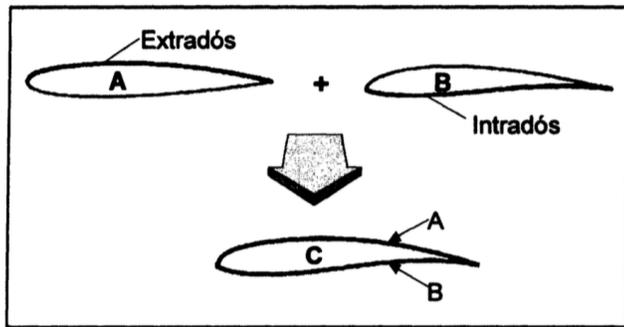


Figura 1. Esquema de generación de un perfil aerodinámico con el método paramétrico modificado

Características geométricas

Los ocho perfiles evaluados experimentalmente fueron trazados con la metodología antes descrita y están identificados como: SZ-1509, SZ-1510, SZ-1534, SZ-1548, SZ-1551, SZ-1561, SZ-1576 y SZ-1597. Los contornos, el espesor máximo adimensional, la abscisa de la sección de espesor máximo y la flecha máxima adimensional y la abscisa correspondiente se muestran en las Figuras 2 a la 9; mientras que las coordenadas adimensionales del intradós y del extradós se indican en las Tablas A-1 a la A-8, del anexo. La adimensionalización se realizó dividiendo los valores de las coordenadas entre la cuerda del perfil. Los perfiles fueron seleccionados en base a los siguientes criterios:

- Un espesor máximo de 11% a 20 % de la cuerda.
- La abscisa del espesor máximo está situada entre 29%-34% de la cuerda, medida a partir del borde de ataque.
- La flecha máxima varía entre 0,7% y 4% de la cuerda.
- La abscisa correspondiente a la flecha máxima varía en el intervalo de 20% a 63% de la cuerda.

Los valores de los espesores máximos adimensionales de los perfiles estudiados son: 0,0750; 0,11847; 0,13480; 0,13500; 0,13801; 0,16657; 0,19500 y 0,19969.

Cuatro de los perfiles tienen la misma abscisa adimensional del espesor máximo, $x_{\delta_{\max}} = 0,30$, para otro $x_{\delta_{\max}} = 0,31$ y para los tres restantes $x_{\delta_{\max}} = 0,34$.

La flecha máxima adimensional de los perfiles estudiados tiene los valores: 0,00750 (en dos perfiles); 0,01587; 0,01679; 0,02250, 0,02841; 0,02924; 0,03700.

En concreto, las abscisas adimensionales correspondientes a las flechas máximas son: 0,19788; 0,30000 (en tres perfiles); 0,33928; 0,56526; 0,62933, 0,62941.

FABRICACIÓN DE LAS ALAS

Se construyeron ocho alas cilíndricas, una para cada perfil objeto de este estudio. La envergadura, $b = 450$ mm, de las alas ha sido impuesta por el ancho de la sección de ensayos del túnel de viento. La cuerda, $c = 150$ mm, de los perfiles se determinó asumiendo el valor mínimo para la envergadura adimensional, $b/c = 3$, según la recomendación que aparece en el manual del túnel de viento [Plint & Partners Ltd. Engineers, 1974a].

Las alas se fabricaron utilizando el Cedro como el tipo de madera que, por sus características mecánicas, peso específico, escasa humedad y facilidad de mecanizado, aseguraba la rigidez necesaria y un acabado liso.

Para cada ala se ha utilizado una plantilla a fin de asegurar la conservación del perfil a lo largo de toda la envergadura.

Todas las alas han sido cubiertas por varias capas de laca sellador, aplicada con pistola, asegurando de esta manera una superficie lisa y protegida contra la humedad.

El acabado final se obtuvo puliendo las alas con cera a base de silicona.

En uno de los extremos de cada ala se perforó un agujero, paralelo a las generatrices del ala, situado a 1/4 de la cuerda a partir del borde de ataque. De acuerdo al espesor del ala se escogió uno de los dos diámetros, $\Phi = 6,6$ mm o $\Phi = 12,4$ mm, de los ejes disponibles que sirven para sujetar el ala a la balanza aerodinámica.

TÚNEL DE VIENTO Y METODOLOGÍA DE ENSAYOS

Características del túnel de viento

El banco de pruebas utilizado para el ensayo de las alas de madera fue un túnel de viento subsónico, modelo TE 44/A, construido por la empresa "Plint & Partners Ltd. Engineers" [1974a,b]. Este banco está instalado en el Laboratorio de Mecánica de los Fluidos de la Universidad Simón Bolívar. Una vista lateral del túnel, específicamente del lado derecho, se muestra en la Figura 10. El túnel tiene una longitud total de 4,41 m y consiste de un motor eléctrico que acciona un ventilador, cuya zona de aspiración está provista de una malla metálica para evitar la penetración de objetos extraños, una compuerta de control de caudal de aire, un divergente, una cámara de tranquilización del flujo, un convergente y un tramo recto, de sección cuadrática 456 mm x 456 mm, donde se realiza un flujo bidimensional y que sirve para la ubicación de las alas sometidas a la evaluación aerodinámica.

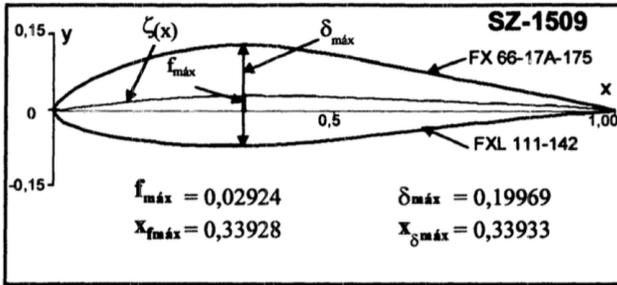


Figura 2. Características geométricas del perfil SZ-1509

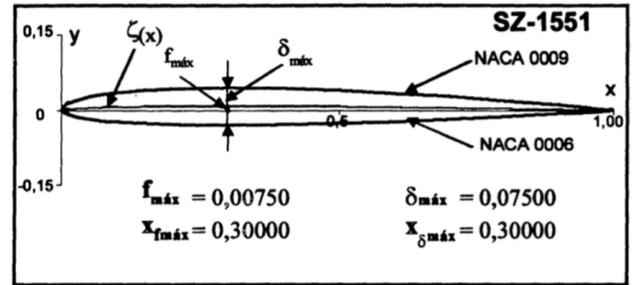


Figura 6. Características geométricas del perfil SZ-1551

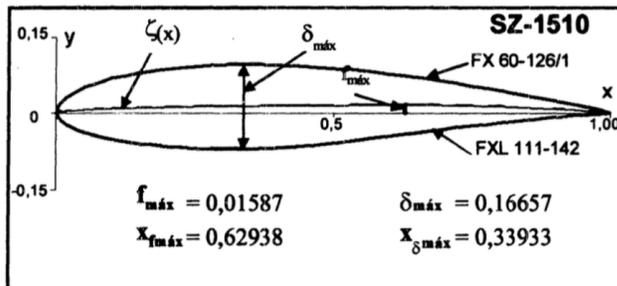


Figura 3. Características geométricas del perfil SZ-1510

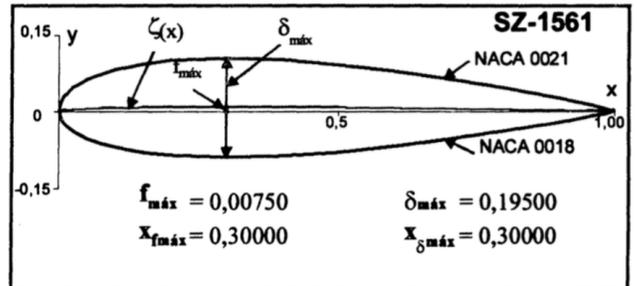


Figura 7. Características geométricas del perfil SZ-1561

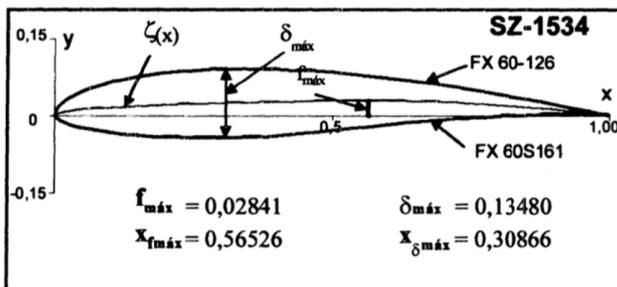


Figura 4. Características geométricas del perfil SZ-1534

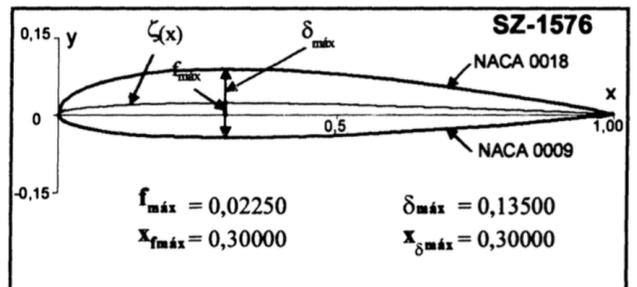


Figura 8. Características geométricas del perfil SZ-1576

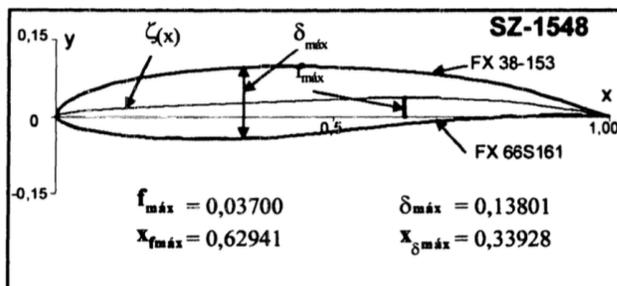


Figura 5. Características geométricas del perfil SZ-1548

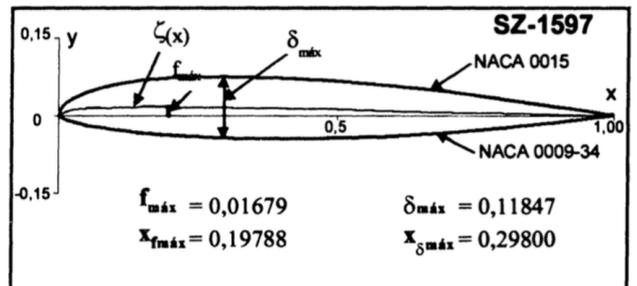


Figura 9. Características geométricas del perfil SZ-1597

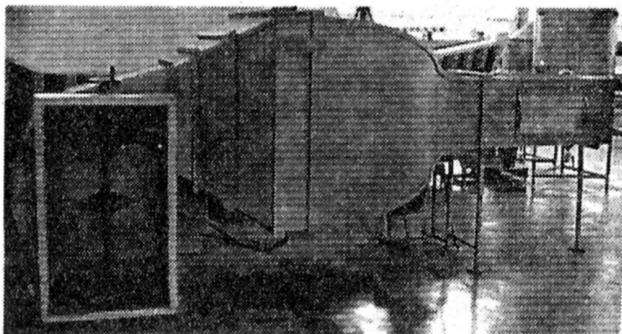


Figura 10. Vista lateral (lado derecho) del túnel de viento TE 44/A

La velocidad máxima del flujo de aire en la zona de ensayos es de 35 m/seg.

La aspiración de aire en el túnel de viento es perpendicular a la dirección de descarga a la salida del tramo de ensayos, situada a 3,88 m de distancia, de manera que no existe interferencia entre estos dos flujos.

El túnel de viento estuvo ubicado con su plano de simetría vertical del tramo de ensayos en el plano vertical de simetría del laboratorio. El espacio libre de obstáculos tenía un ancho de 15 m, una longitud de 30 m y una altura de 6 m. En consecuencia, las paredes y el techo del laboratorio no han influido prácticamente sobre las condiciones de aspiración y de descarga del flujo de aire en el túnel de viento, durante los ensayos.

En las Figuras 11 y 12 se presentan una vista del lado izquierdo del túnel de viento, con la balanza aerodinámica, y un detalle de la balanza aerodinámica, respectivamente.

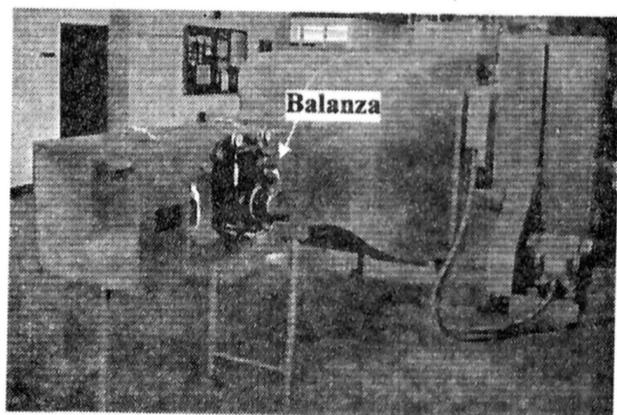


Figura 11. Lado izquierdo del túnel de viento TE44/A

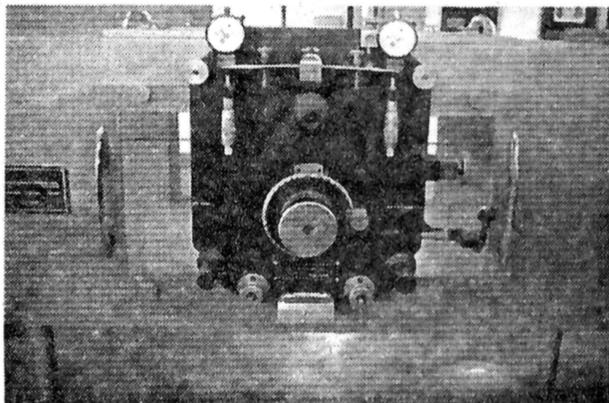


Figura 12. Balanza de tres componentes TE 81/A

En la Figura 13 se pueden apreciar un detalle de la instalación del tubo de Pitot y el ala de madera, instalados en el túnel de viento.

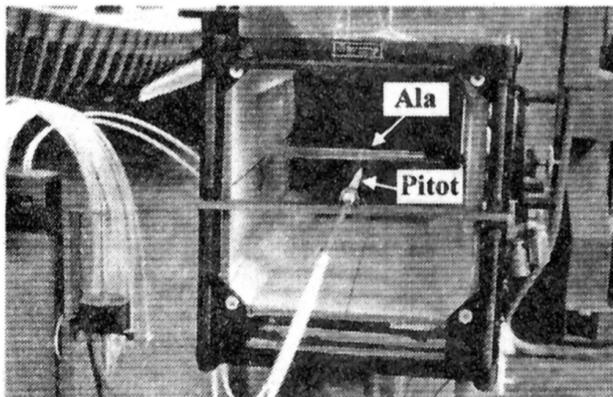


Figura 13. Vista de la sección de descarga del túnel de viento TE 44/A

Instrumentación y metodología de ensayos

En el proceso de investigación experimental se utilizaron cinco instrumentos: un barómetro, un termómetro de bulbo seco y de bulbo húmedo, un tubo de Pitot, una balanza aerodinámica de tres componentes TE 81/A [Plint & Partners Ltd. Engineers, 1974b] y un vibrador para atenuar cualquier efecto causado por la fricción entre los componentes de la balanza aerodinámica [Lenis y Díaz, 1995; Pankhurst y Holder, 1952].

Previo a los ensayos se ha verificado el carácter bidimensional del flujo en el tramo recto del ducto donde se ubican las alas objeto de estudio. Para tal fin se utilizaron los resultados de las mediciones efectuadas con el hilo caliente [Pérez, 1983] y los datos obtenidos por cálculo del espesor de la capa límite turbulenta sobre las paredes del ducto, utilizando las formulas conocidas [Rosenhead, 1963]. Por las dos vías se

obtuvo prácticamente el mismo resultado: el espesor de la capa límite turbulenta sobre las paredes del ducto, en la zona de ubicación del ala es de 1,2 mm aproximadamente. A una distancia de 144 mm corriente arriba del ala la velocidad medida con el hilo caliente es constante sobre la vertical y en el plano horizontal [Pérez, 1983], en consecuencia, el flujo se puede considerar uniforme y bidimensional.

El juego entre cada uno de los extremos del ala y las paredes verticales del ducto es de aproximadamente 3 mm. Este juego origina un incremento de la fuerza de arrastre que es relativamente pequeño en comparación con la fuerza de resistencia al avance provocada por el ángulo de ataque. Para caracterizar el acabado superficial de las alas se midió la rugosidad absoluta (k) tanto del intradós como del extradós, con un rugosímetro de contacto marca Mitutoyo, modelo SJ-301. El valor promedio de la rugosidad está reportado en las Figuras 14 a la 21 y su influencia aparece reflejada en las curvas características de cada perfil.

Al inicio de cada ensayo se efectuó la medición de presión atmosférica y temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo, a fin de calcular la densidad del aire ρ , por ende, el número de Reynolds. Seguidamente se fijó la apertura de las compuertas del ventilador para regular la velocidad de flujo del ensayo. Para cada modelo de perfil se fijaron dos aperturas distintas, es decir, se efectuaron ensayos a dos números de Reynolds distintos, en el intervalo de 281000 a 316000. Se midieron la fuerza de sustentación (L), la resistencia aerodinámica (D) y el momento aerodinámico sobre el ala (M) respecto a 1/4 de la cuerda medido desde el borde de ataque, para variaciones del ángulo de ataque de dos en dos grados, desde -2° hasta el valor más próximo del ángulo para el cual se inicia el desprendimiento de la capa límite y se alcanza máxima sustentación. Con las mediciones obtenidas se procedió al cálculo de los valores de coeficiente de sustentación (C_L), coeficiente de resistencia aerodinámica (C_D) y coeficiente de momento aerodinámico (C_M), y se graficaron las curvas características (Figuras 14 a la 21).

Cálculo de la densidad y de los coeficientes aerodinámicos

La densidad del aire depende de la presión atmosférica (P_{am}), la temperatura y la humedad relativa y, como se sabe, representa el inverso del volumen específico (v)

$$\bar{n} = \frac{1}{v} \quad (1)$$

El volumen específico tiene la expresión [Carrier *et al.*, 1959], en unidades inglesas:

$$\bar{v} = \frac{0,754(Tbs + 460)}{P_{am}} \left(1 + \frac{7000w}{4360}\right) \quad (2)$$

Donde la humedad específica w , viene dada por [Carrier *et al.*, 1959]

$$w = \frac{0,622P_v}{P_{am} - P_v} \quad (3)$$

y

$$P_v = P_w - \frac{(P_{am} - P_w)(Tbs - Tbh)}{2800 - 1,3Tbh} \quad (4)$$

siendo,

P_v : Presión parcial del vapor de agua

P_w : Presión de saturación a la temperatura de bulbo húmedo (Tbh)

Tbs : Temperatura de bulbo seco expresada en grados Fahrenheit ($^\circ F$)

Tbh : Temperatura de bulbo húmedo expresada en grados Fahrenheit ($^\circ F$)

La presión atmosférica se determina con el barómetro, las temperaturas Tbs y Tbh se miden utilizando el termómetro adecuado y P_w se obtiene mediante tablas de vapor saturado.

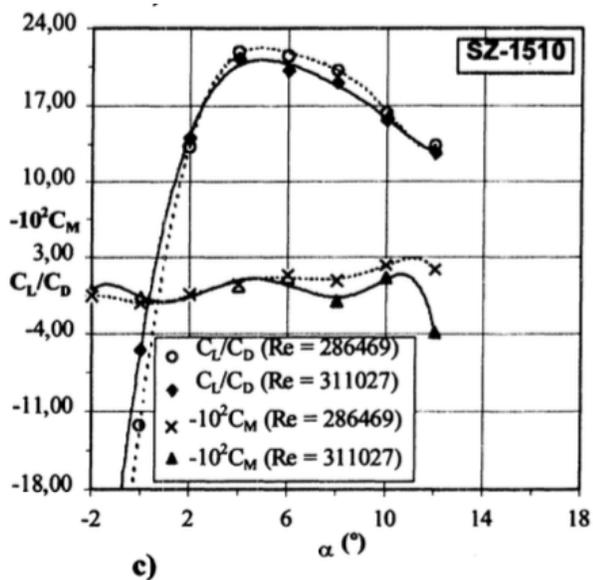
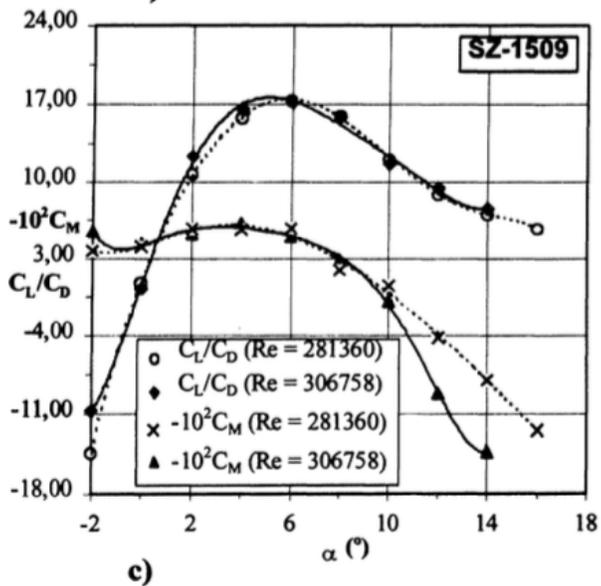
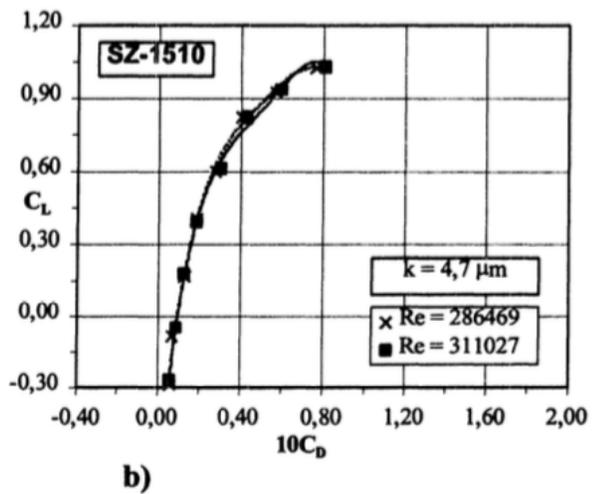
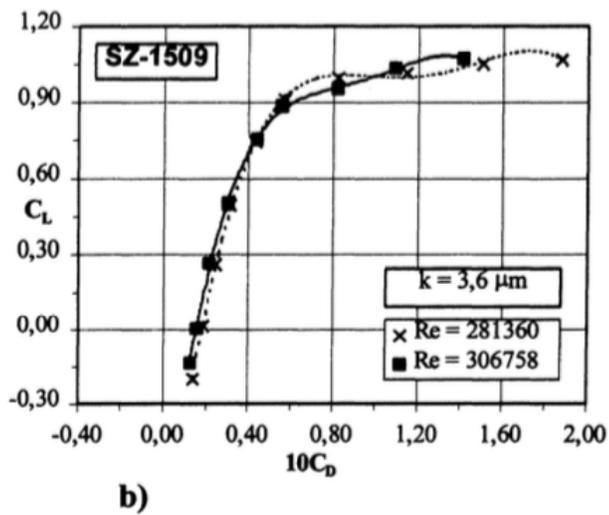
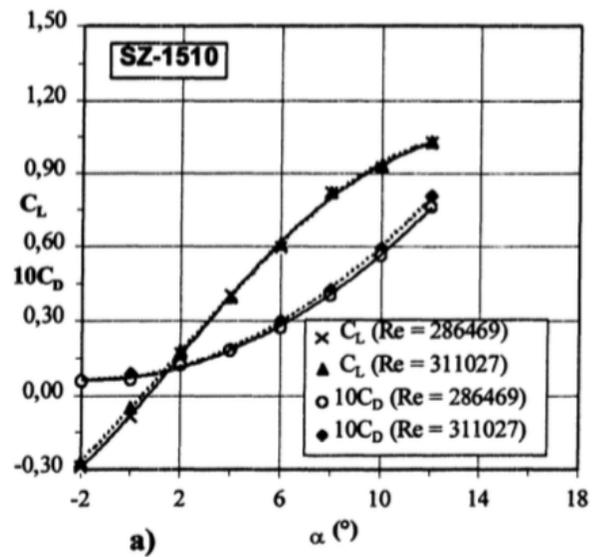
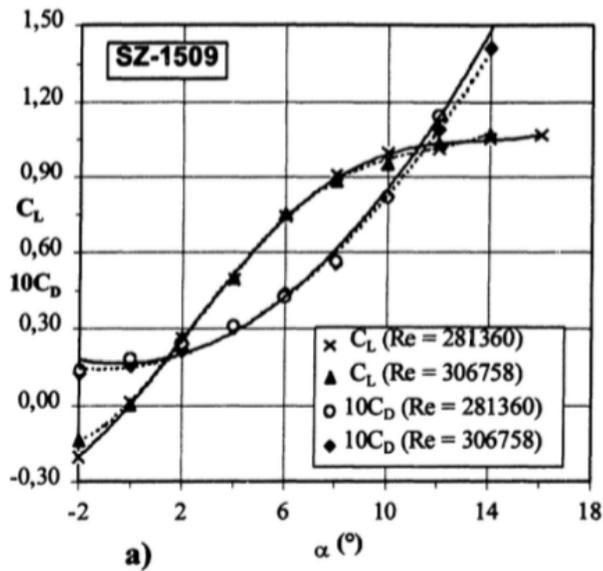


Figura 14. a, b, c. Curvas características del Perfil SZ-1509

Figura 15. a, b, c. Curvas características del Perfil SZ-1510

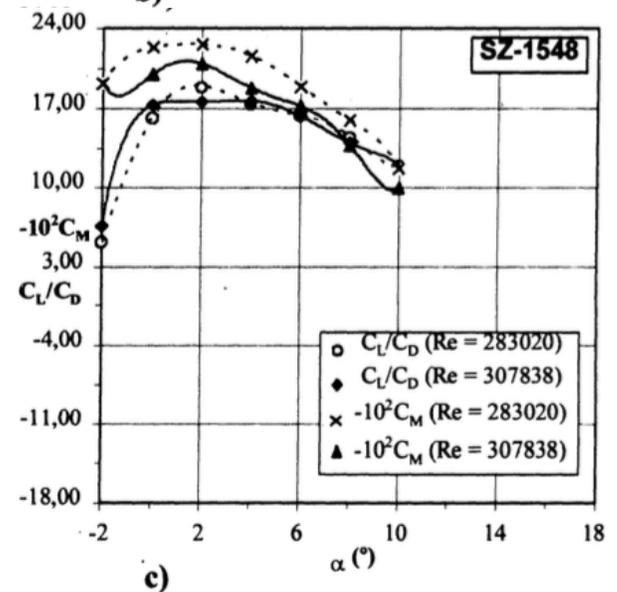
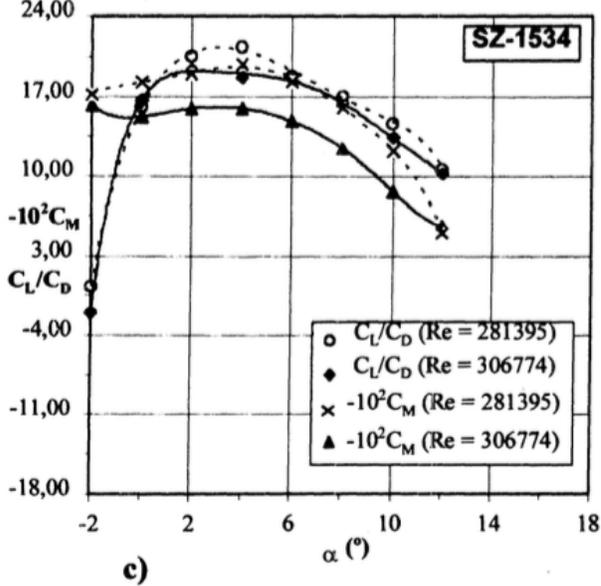
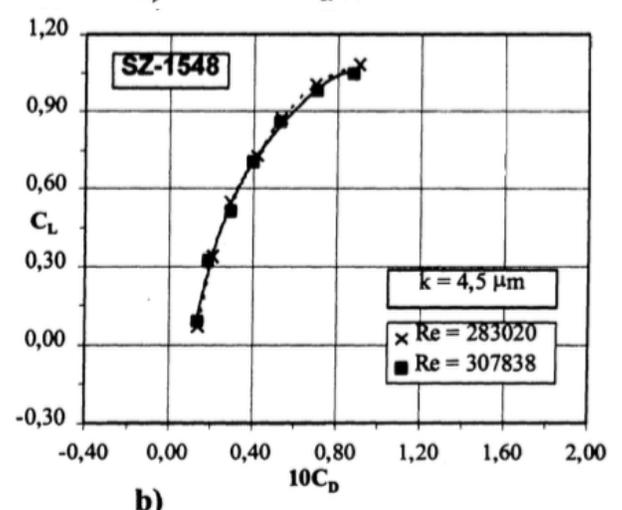
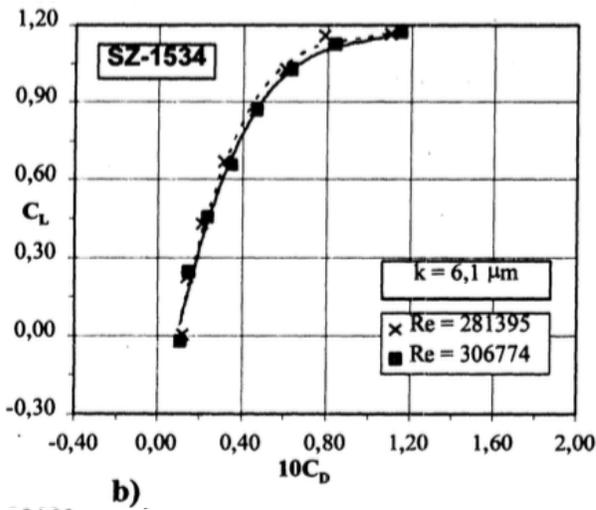
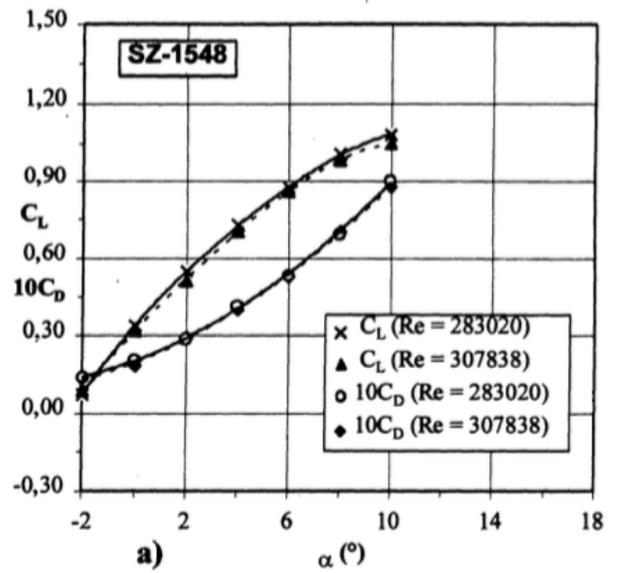
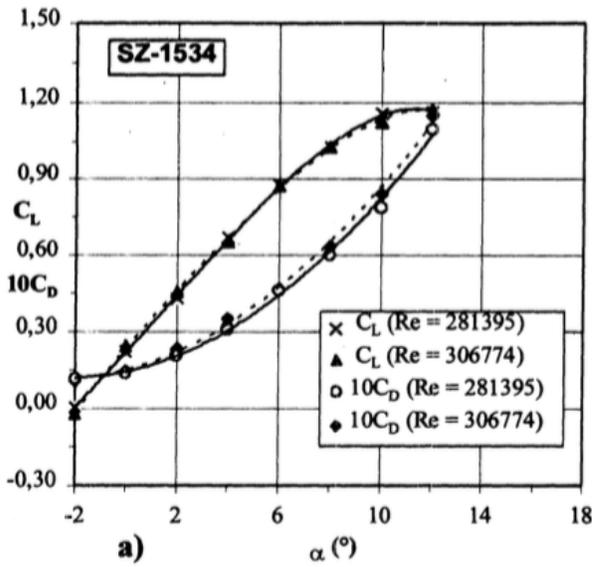


Figura 16. a, b, c. Curvas características del Perfil SZ-1534

Figura 17. a, b, c. Curvas características del Perfil SZ-1548

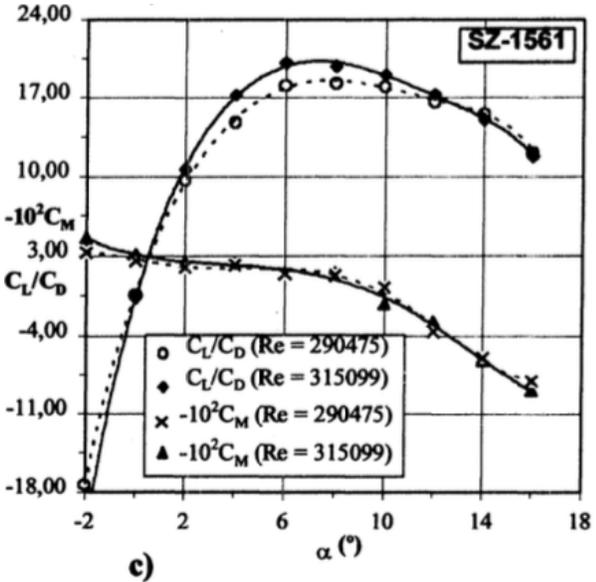
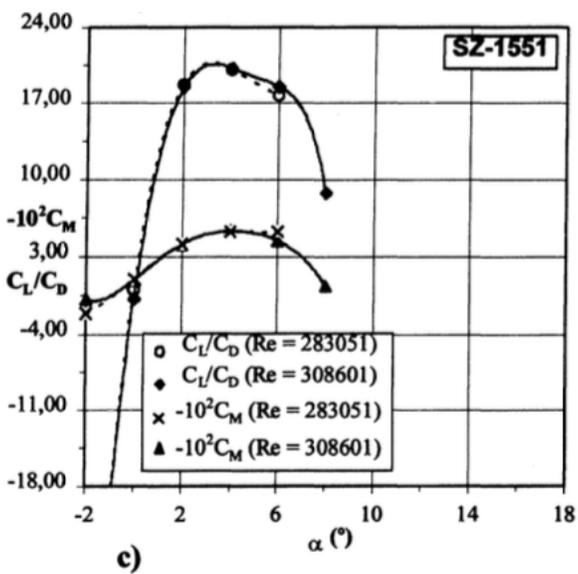
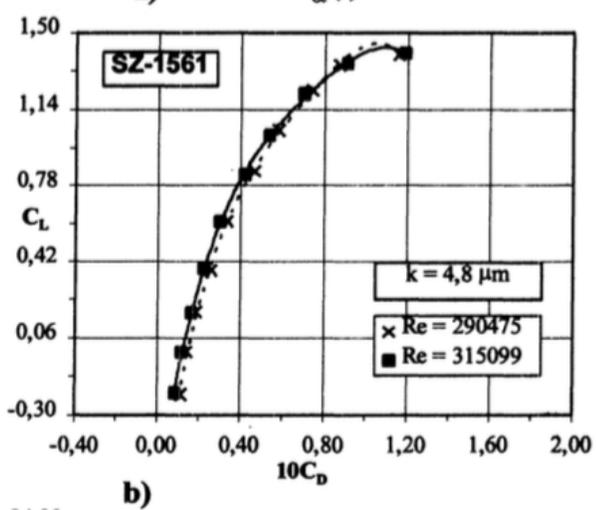
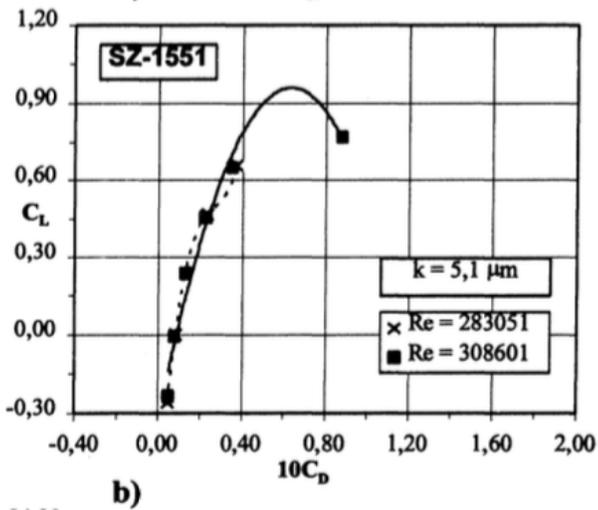
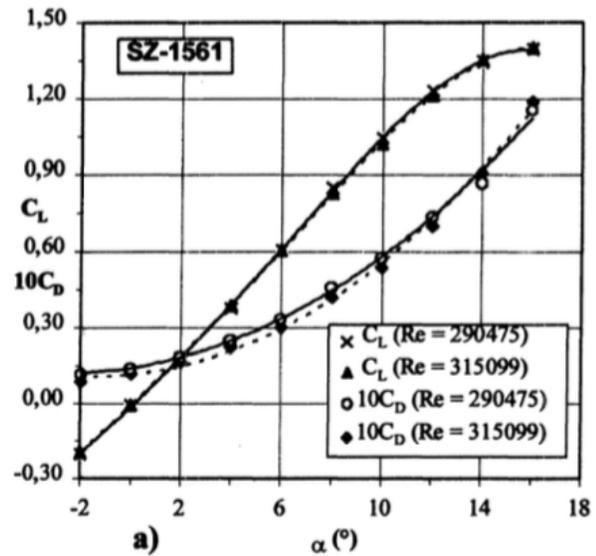
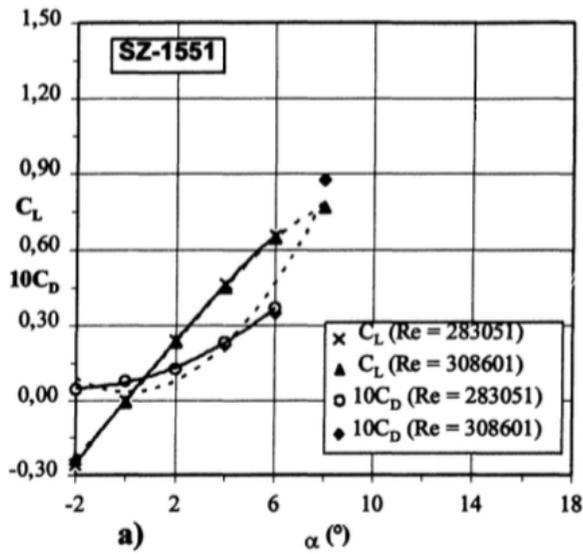


Figura 18. a, b, c. Curvas características del Perfil SZ-1551

Figura 19. a, b, c. Curvas características del Perfil SZ-1561

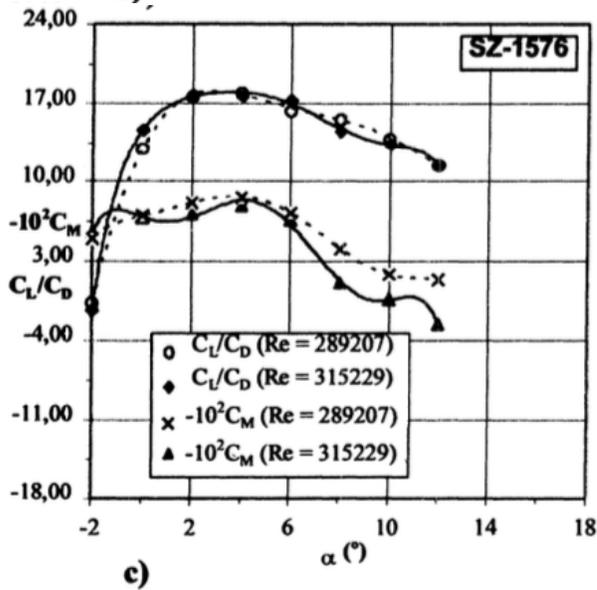
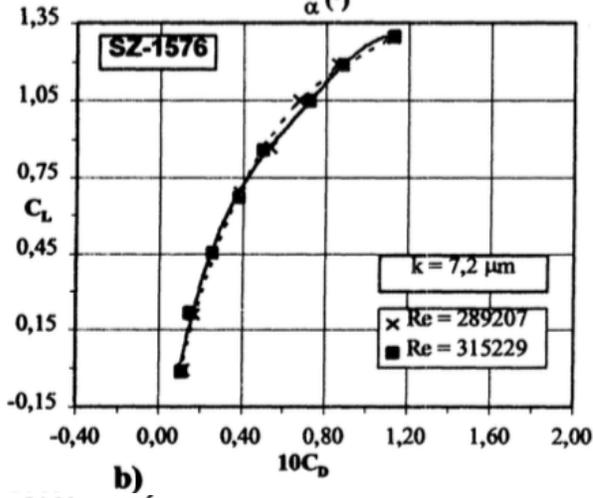
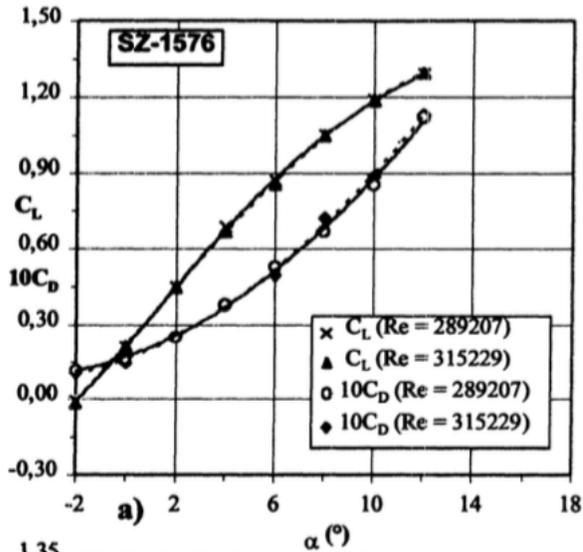


Figura 20. a, b, c. Curvas características del Perfil SZ-1576

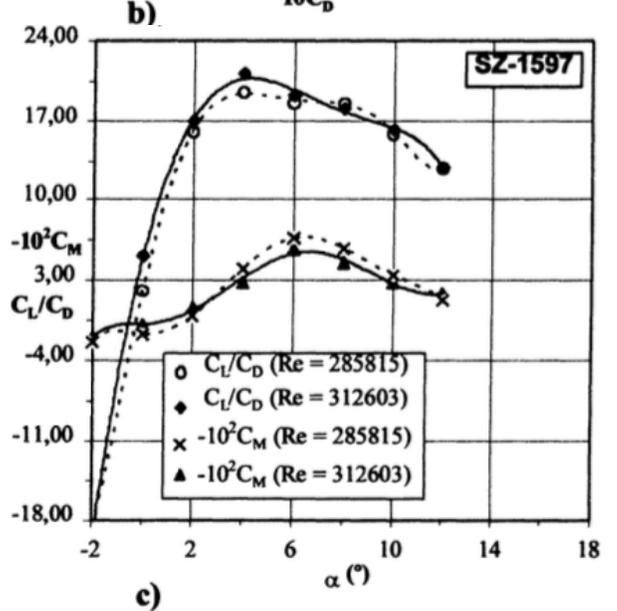
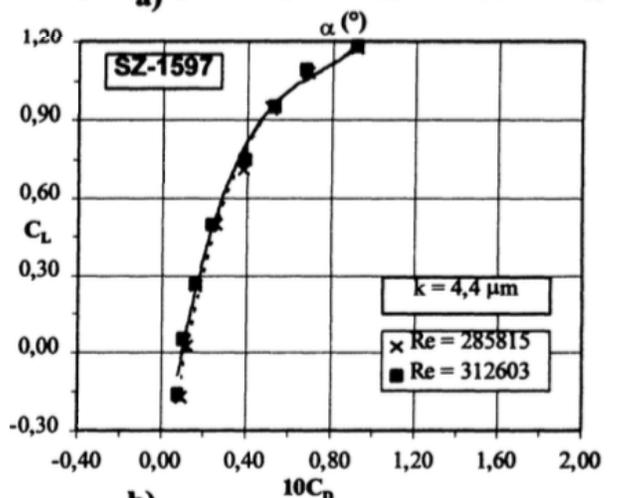
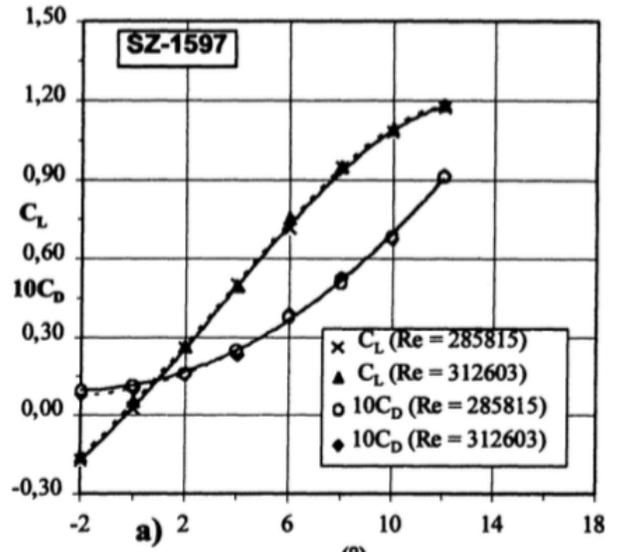


Figura 21. a, b, c. Curvas características del Perfil SZ-1597

Utilizando las expresiones conocidas para el cálculo de las fuerzas de sustentación (L) y de arrastre (D) y del momento aerodinámico (M), resulta:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 S} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 S} \quad (6)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 S c} \quad (7)$$

donde, V_0 : Velocidad de la corriente no perturbada en la sección de ensayo del túnel, S : Superficie del ala ($S = bc$). Sustituyendo los valores de las magnitudes medidas directamente (L , D , M , V_0 , c , b) y el valor calculado de la densidad, ρ , se obtienen los datos necesarios para trazar las curvas características de los perfiles C_L vs. α , C_D vs. α , C_M vs. α , C_L vs. C_D y C_L/C_D vs. α .

Para un ala de dimensiones conocidas los coeficientes aerodinámicos C_L , C_D y C_M dependen del ángulo de ataque, α , y del número de Reynolds.

Debido al juego de aproximadamente 3 mm entre los bordes del ala y las paredes de la zona de ensayo del túnel, se originan torbellinos en estos bordes y el flujo, localmente, tiene un carácter tridimensional. Los valores de C_L , C_D y C_M calculados a partir de las formulas (5), (6) y (7) reflejan la influencia de todos los factores involucrados en el flujo alrededor del ala incluyendo el efecto tridimensional local.

Tomando en cuenta que el juego relativo, b'/b , de las alas es pequeño

$$\frac{b'}{b} = \frac{3}{450} = 6,67 \times 10^{-3}$$

el efecto de los torbellinos de los extremos es también pequeño y el ala se podría considerar como si fuera de envergadura infinita. En consecuencia, se puede asumir que los valores de los coeficientes aerodinámicos calculados a partir de las formulas (5), (6) y (7), son prácticamente iguales a los valores del flujo bidimensional alrededor del ala, considerada de envergadura infinita.

Fuentes de error

Las mediciones de las magnitudes que intervienen en las expresiones de los coeficientes aerodinámicos han sido acompañadas, inevitablemente, de los errores que se especifican a continuación: ángulo de ataque (5%), momento y fuerzas de sustentación y arrastre (7%),

velocidad del flujo de aire (3%), presión atmosférica (2%), densidad del aire (4%), cuerda (0,5%), envergadura (0,2%). El error total, E_T , en la determinación de los coeficientes aerodinámicos es

$$E_T = \sqrt{5^2 + 7^2 + 3^2 + 2^2 + 4^2 + 0,5^2 + 0,2^2} = 9,34\%$$

Las principales fuentes de error se originaron en la medición del ángulo de ataque y de la fuerza de arrastre.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron tres gráficas por cada perfil, para los dos números de Reynolds considerados, las cuales se presentan en las Figuras 14a, b, c a la 21a, b, c. En todos los casos, la primera de éstas gráficas (a) muestra los valores de C_L , y C_D en función del ángulo de ataque (α). Para hacer coincidir la representación de ambos coeficientes en una misma escala, se debió graficar $10C_D$ vs. α , es decir, diez veces el valor de C_D versus α . En la segunda gráfica (b) aparece la curva polar, C_L en función de $10C_D$. La tercera gráfica (c) presenta valores del coeficiente de momento aerodinámico y de la relación C_L/C_D , o fineza aerodinámica, en función del ángulo de ataque. Cada trío de gráficas está identificado por el nombre del perfil.

En la Tabla 1 se pueden apreciar los valores de parámetros relevantes, obtenidos luego de procesar los datos experimentales: número de Reynolds (Re), el valor máximo del coeficiente de sustentación, C_{Lmax} , ángulo de ataque, α_{CLmax} , para el cual se obtuvo C_{Lmax} , el valor del coeficiente de arrastre, C_{DLmax} , correspondiente al ángulo α_{CLmax} , la pendiente, $\Delta C_L/\Delta \alpha$, de la curva C_L vs. α , la fineza aerodinámica máxima, $(C_L/C_D)_{max}$, y el ángulo de ataque correspondiente, $\alpha_{(CL/CD)max}$, y el valor de $(C_L/C_D)_{CLmax}$, asociado al ángulo α_{CLmax} , previo al desprendimiento del flujo. No se incluyeron los valores del coeficiente de momento aerodinámico por presentar una variación leve.

Análisis comparativo de los resultados

En base a los resultados obtenidos en los ensayos en el túnel de viento se identificaron los dos perfiles extremos: el SZ-1551, de comportamiento aerodinámico más modesto, y el SZ-1561, que se caracteriza por los valores más elevados del coeficiente de sustentación (1,4), siendo el mejor de la muestra. La comparación de los valores de los coeficientes aerodinámicos de cada perfil con los de los perfiles SZ-1551 y SZ-1561 permitió correlacionar el comportamiento aerodinámico con los cuatro parámetros, δ_{max} , f_{max} y x_{fmax} , que caracterizan la geometría de los perfiles.

Perfil SZ-1551

Para fines de análisis comparativo del comportamiento aerodinámico de los perfiles estudiados se escogió como uno de los perfiles de referencia. Este delgado perfil, prácticamente simétrico, presentó los menores valores de $C_{Lmáx}$ (entre 0,6569 y 0,7687) y el menor ángulo de ataque previo al desprendimiento de la capa límite ($\alpha_{CLmáx} = 6^\circ$ y $\alpha_{CLmáx} = 8^\circ$, respectivamente). La pendiente de la curva C_L vs. α es relativamente alta y la fineza aerodinámica (entre 18 y 20) también. El coeficiente de momento aerodinámico varía poco según una ley parabólica y cambia de signo (-0,05 a 0,01).

Perfil SZ-1561

La peculiaridad geométrica de este perfil, prácticamente simétrico, consiste en tener los mismos valores de los parámetros $x_{\delta máx}$, $f_{máx}$ y $x_{f máx}$ que el perfil SZ-1551 pero un espesor relativo grande (19,5%). La consecuencia es un incremento significativo de $C_{Lmáx}$ (1,3965; 1,4018) y del ángulo de ataque máximo correspondiente (16°). La fineza máxima alcanza prácticamente el mismo valor máximo (20) que el perfil SZ-1551. El coeficiente de momento aerodinámico tiene una variación monótona entre los límites -0,05 a 0,14.

El perfil SZ-1561 mostró el mejor comportamiento del grupo de ocho perfiles evaluados y servirá para la comparación representando el límite superior de los coeficientes de sustentación. En la caracterización de los demás perfiles se utilizará la comparación con uno o los dos perfiles SZ-1551 y SZ-1561.

Perfil SZ-1509

La geometría de este perfil es muy parecida al perfil SZ-1561: $x_{\delta máx} = x_{f máx} = 0,33933$, que es 10% mayor que el perfil SZ-1561, el espesor máximo (19,97%) es 2,5% mayor que en el SZ-1561 y la flecha máxima del esqueleto ($f_{máx} = 0,02924$), aunque pequeña, es 3,89 veces mayor que la del perfil de comparación.

El coeficiente $C_L = 1,0696$ para $Re = 3,07 \cdot 10^5$ y un ángulo de ataque de 14° , es prácticamente igual al valor que se obtiene para $Re = 2,81 \cdot 10^5$ y $\alpha_{CLmáx} = 16^\circ$.

La fineza aerodinámica máxima tiene casi el mismo valor (17,25 en promedio) para los dos números de Reynolds y para $\alpha = 6^\circ$, pero es menor que la de los perfiles SZ-1561 y SZ-1551. El momento aerodinámico tiene una variación monótona, $C_M \varepsilon (-0,06, 0,14)$.

Perfil SZ-1510

A diferencia de los tres perfiles arriba evaluados, el perfil SZ-1510 se caracteriza por un espesor máximo (16,66%) menor que en el caso del SZ-1561, $x_{f máx} = 1,854x_{\delta máx}$ y una flecha máxima (1,59%) dos veces mayor que la del perfil de comparación. El coeficiente de sustentación es supraunitario y varía poco con el número de Reynolds, $C_{Lmáx} = 1,0283$ para $Re = 286469$ y $1,0295$ para $Re = 311027$, ambos para $\alpha_{CLmáx} = 12^\circ$. La fineza aerodinámica máxima (21,944) es mayor a la de todos los demás perfiles estudiados. El coeficiente del momento aerodinámico es positivo y varía poco, $C_M \varepsilon (0,01, 0,04)$.

Tabla 1. Valores resaltantes de los parámetros aerodinámicos y los ángulos de ataque correspondientes.

| Perfil | Nº de Reynolds | $C_{Lmáx}$ | $\alpha_{CLmáx}$ | $C_{DImáx}$ | α_{CL}/α | $(C_L/C_D)_{\alpha máx}$ | $(C_L/C_D)_{máx}$ | $\alpha(C_L/C_D)_{máx}$ |
|---------|----------------|------------|------------------|-------------|----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| SZ-1509 | 281360 | 1,0692 | 16° | 0,1877 | 0,117 | 5,6977 | 17,3288 | 6° |
| | 306758 | 1,0696 | 14° | 0,1413 | | 7,5694 | 17,1671 | 6° |
| SZ-1510 | 286469 | 1,0283 | 12° | 0,0765 | 0,107 | 13,4503 | 21,9440 | 4° |
| | 311027 | 1,0295 | 12° | 0,0809 | | 12,7288 | 21,2531 | 4° |
| SZ-1534 | 281395 | 1,1655 | 12° | 0,1100 | 0,106 | 10,5911 | 21,3949 | 4° |
| | 306774 | 1,1723 | 12° | 0,1150 | | 10,1953 | 19,3587 | 2° |
| SZ-1548 | 283020 | 1,0829 | 10° | 0,0904 | 0,094 | 11,9857 | 18,9184 | 2° |
| | 307838 | 1,0480 | 10° | 0,0877 | | 11,9494 | 17,6127 | 4° |
| SZ-1551 | 283051 | 0,6569 | 6° | 0,0371 | 0,111 | 17,7231 | 20,1072 | 4° |
| | 308601 | 0,7687 | 8° | 0,0877 | | 8,7651 | 20,1810 | 4° |
| SZ-1561 | 290475 | 1,3965 | 16° | 0,1158 | 0,100 | 12,0561 | 18,3320 | 8° |
| | 315099 | 1,4018 | 16° | 0,1189 | | 11,7909 | 20,0885 | 6° |
| SZ-1576 | 289207 | 1,2937 | 12° | 0,1124 | 0,112 | 11,5142 | 17,9838 | 4° |
| | 315229 | 1,2965 | 12° | 0,1130 | | 11,4697 | 17,7819 | 2° |
| SZ-1597 | 285815 | 1,1746 | 12° | 0,0915 | 0,117 | 12,8355 | 19,5477 | 4° |
| | 312603 | 1,1809 | 12° | 0,0916 | | 12,8919 | 21,1474 | 4° |

Perfil SZ-1534

La geometría de este perfil, caracterizada por un espesor máximo de 13,48%, situado a 33,53% de la cuerda, y una flecha máxima de 2,84% y $x_{f_{máx}} = 0,56526$, permitió la obtención de coeficientes $C_{Lmáx}$ relativamente elevados (1,1655 para $Re = 281395$ y 1,1723 para $Re = 306774$) a un ángulo $\alpha_{CLmáx} = 12^\circ$. La fineza máxima varía entre 19,36 y 21,39, para $\alpha = 2^\circ$ a $\alpha = 4^\circ$. El coeficiente del momento aerodinámico es negativo y varía entre -0,03 y -0,16.

Perfil SZ-1548

Los cuatro parámetros geométricos $\delta_{máx}$, $x_{\delta_{máx}}$, $f_{máx}$ y $x_{f_{máx}}$ de este perfil superan en aproximadamente 10% a los del perfil SZ-1534. Esta geometría arroja como resultado valores de $C_{Lmáx}$ supraunitarios, pero en 10% menores respecto al perfil SZ-1534 para $\alpha_{CLmáx} = 12^\circ$. La fineza aerodinámica máxima varía entre 17,61 y 18,92. El coeficiente $C_M \varepsilon$ (-0,10, -0,18), presenta una variación monótona.

Perfil SZ-1576

Con $x_{\delta_{máx}} = x_{f_{máx}} = 0,300$, $\delta_{máx} = 0,135$ y $f_{máx} = 0,0225$, el perfil logra coeficientes de sustentación altos, $C_{Lmáx}$ 1,2937 ($Re = 289207$) y 1,2965 ($Re = 315229$), para $\alpha_{CLmáx} = 12^\circ$; clasificándose como el segundo mejor perfil de la muestra. La fineza aerodinámica (C_L/C_D) $_{máx}$ varía poco entre 17,78 y 17,98. El coeficiente $C_M \varepsilon$ (-0,05, 0,03), tiene una variación monótona.

Perfil SZ-1597

La peculiaridad de este perfil consiste en la posición de la flecha máxima ($f_{máx} = 0,01679$), ubicada muy cerca del borde de ataque ($x_{f_{máx}} = 0,19788$). El espesor máximo es de 11,85% y $x_{\delta_{máx}} = 0,2980$. Los valores de los coeficientes aerodinámicos permiten clasificar a este perfil en el tercer lugar de la muestra: $C_{Lmáx}$ 1,1746 ($Re = 285815$) y 1,1809 ($Re = 312603$), se logran para $\alpha_{CLmáx} = 12^\circ$. La fineza aerodinámica máxima varía entre 19,55 y 21,15 para $\alpha = 4^\circ$. El coeficiente del momento aerodinámico, $C_M \varepsilon$ (-0,02, 0,02), varía poco.

Caracterización global de los perfiles estudiados

En base a los valores del coeficiente de sustentación máximo y al ángulo $\alpha_{CLmáx}$ los ocho perfiles evaluados pueden ser clasificados, en orden descendente, como sigue: SZ-1561, SZ-1576, SZ-1597, SZ-1534, SZ-1548, SZ-1509, SZ-1510 y SZ-1551.

Los valores del coeficiente de sustentación para todos los perfiles son directamente proporcionales al valor del número de Reynolds, salvo en el caso del SZ-1548, como en el caso de los resultados clásicos obtenidos para $Re > 10^6$.

El coeficiente de arrastre varía directamente proporcional con el Re , salvo el caso del perfil SZ-1548, para el cual $C_D \sim 1/Re$, comportamiento que se podría explicar tanto por la geometría del perfil como por cierta imprecisión en la medición de la fuerza de arrastre.

El pequeño valor de la flecha máxima no permitió determinar su influencia sobre el comportamiento aerodinámico, que quedó marcado por los valores del espesor máximo y la ubicación que tiene respecto al borde de ataque.

Siete de los perfiles estudiados tienen un espesor máximo mayor de 11%, llegando hasta 19,97%, y se caracterizan por coeficientes de sustentación $C_{Lmáx} > 1$.

El perfil SZ-1551, con $\delta_{máx} = 7,5\%$, alcanza solamente un valor de $C_{Lmáx} = 0,7687$ para $Re = 308601$. El coeficiente de arrastre varía también directamente proporcional con el espesor máximo del perfil.

Todos los valores de $C_{Lmáx}$ ponen en evidencia que, en comparación con los perfiles mencionados en la literatura, son perfiles muy eficientes, en consecuencia potencialmente susceptibles de ser utilizados en el diseño de turbomáquinas.

La fineza aerodinámica varió poco, manteniéndose en el intervalo 17,16 - 21,39; lo que representa un argumento adicional que sustenta la afirmación de que los perfiles estudiados son eficientes. El comportamiento del coeficiente de momento aerodinámico refuerza la afirmación arriba formulada.

CONCLUSIONES

La evaluación experimental a bajos números de Reynolds de los ocho perfiles de la serie SZ-1500 permite formular las conclusiones siguientes:

Los ocho perfiles trazados con el método paramétrico modificado tiene una geometría parecida a los perfiles conocidos y se caracterizan por los parámetros geométricos $\delta_{máx} = 75\% - 19,97\%$, $x_{\delta_{máx}} = 30\% - 34\%$, $f_{máx} = 0,75\% - 3,7\%$ y $x_{f_{máx}} = 19,79\% - 62,94\%$.

Para $Re < 3,2 \cdot 10^5$, con la excepción del perfil SZ-1548, resultó que los coeficientes $C_{Lmáx} \sim Re$ y $C_{DLmáx} \sim Re$,

comportamiento diferente al clásico cuando $Re > 10^6$ ($C_{Lm\acute{a}x} \sim Re$ y $C_{DLm\acute{a}x} \sim 1/Re$).

Los coeficientes aerodinámicos $C_{Lm\acute{a}x}$ y $C_{DLm\acute{a}x}$ varían directamente proporcional con el espesor máximo del perfil.

Todos los perfiles estudiados, exceptuando el SZ-1551, alcanzan valores de $C_{Lm\acute{a}x} > 1$, lográndose en el perfil SZ-1561 obtener $C_{Lm\acute{a}x} = 1,4018$ para $Re = 315099$, valor realmente alto para el régimen del flujo considerado.

Los pequeños valores de la flecha máxima no favorecieron evidenciar la influencia de éste parámetro sobre los coeficientes aerodinámicos, quedando el espesor máximo como el principal parámetro geométrico que detenninó el comportamiento aerodinámico.

La poca variación de la abscisa de la sección de ubicación del espesor máximo no permitió cuantificar su influencia sobre los coeficientes aerodinámicos.

El valor del ángulo de ataque $\alpha_{C_{Lm\acute{a}x}}$ es alto. Para el perfil óptimo, SZ-1561, fue de 16° .

El coeficiente de momento aerodinámico se caracterizó por valores pequeños y una variación monótona, a veces cambiando de signo.

Por su buen comportamiento aerodinámico los perfiles estudiados pueden ser aprovechados y utilizados en diseño de componentes de turbomáquinas, donde se requieren perfiles de espesor máximo superior a 11%.

La fineza aerodinámica se mostró alta, variando en el intervalo de 17,16 a 21,39.

REFERENCIAS

ABBOIT L., VON DOENHOFF A. 1959. Theory of Wing Sections. Dover Publications, New York.

ANDERSON J. 1991. Fundamentals of Aerodynamics. 2nd Edition, McGraw-Hill, USA.

CARAFOLI E., CONSTANTINESCU V. 1981. Dinamica Fluidelor Incompresibile. Edit. Academiei, Bucharest.

CARRJER W., CHERNE R., GRANT W., ROBERTS W. 1959. Modern Air Conditioning, Heating, and Ventilating. Pitman Publishing Corp., New York.

IRAUSQUINI., LEAÑEZE. 1997. Trazado y Evaluación

Experimental de Perfiles Aerodinámicos Zarea Serie 1500. Trabajo de grado, Dpto. de Ingeniería Aeronáutica, Instituto Universitario Politécnico de las Fuerzas Armadas Nacionales (UNEFA). Tutor: Prof. S. Zarea.

JACOBS E., SHERMAN A. 1937. Airfoil Sections Characteristics as Affected by Variation of the Reynolds Number. NACA TR-586, USA.

LENIS C., DIAZ H. 1995. Evaluación Experimental de Perfiles Aerodinámicos Zarea Serie 1200. Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Tutor: Prof. S. Zarea.

MCMASTERS J. HENDERSON M. 1979. Low Speed Single-Element Airfoil Synthesis. NASA CP-2085, USA.

MICHOS A., BERGELES G., ATHANASSIADIS N. 1983. Aerodynamic Characteristics of NACA 0012 Airfoil in Relation to Wind Generators. Wind Engineering, Vol. 7, No 4.

MILEY S. 1982. Catalog of Low Reynolds Number, Airfoil Data for Wind Turbine Applications. Boulden, USA.

PANKHURST R., HOLDER D. 1952. Wind Tunnel Techniques. Pitman, London.

PEREZ J. 1983. Anemometría del Hilo Caliente. Trabajo de grado, Universidad Simón Bolívar. Tutor: Prof. R Martínez.

PLINT & PARTNERS LTD. ENGINEERS 1974a. TE 44/A 18 in Blower Tunnel with Three Component Balance Instruments and Models. Berkshire.

PLINT & PARTNERS LTD. ENGINEERS 1974b. TE 81/A Three Component Balance Instructions. Berkshire.

RIEGELS F. 1961. Aerofoil Sections. Butterworth & Co. Publishers, London.

ROSENHEAD L. 1963. Laminar Boundary Layers. Dover Publications Inc., New York.

SHELDAHL R., BLACKWELL B. 1976. Aerodynamic Characteristics of Four Symmetrical Sections Trough 180 Degrees of Attack at Low Reynolds Number. Vertical Axis Wind Technology Workshop, Sandia Laboratories, Albuquerque.

SHIGERU S. ET AL. 1997. Airfoil Sections Characteristics at

- a Low Reynolds Number Journal of Fluid Engineering, 119; 129-135.
- SNYDER M. 1981. Airfoil Data for Wind Turbines. Wind Energy Conversion Devices, von Karman Institute, Lecture Series, Belgium.
- TANGLER J. SOMERS D. 1995. NREL Airfoil Families for HA WTs. Proceedings of the Conference of the American Wind Energy Association, Windpower 95, Washington DC.
- TANGLER J. SOMERS D. 1999. Effects of Airfoil Thickness and Maximum Lift Coefficient on Roughness Sensitivity. Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco.
- ZAREA S. 1970. Generarea Profilelor Aerodinamice prin Inversiune Complexa. Rep. Int., Institut. Polit. Bucharest, Bucharest.
- ZAREA S. 1980. Generación de Perfil Combinando el Intradós y el Extradós de Perfiles Conocidos. Rep. Interno, Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- ZAREA S. 1995. New Methods in Aero-Hydrodynamic Profile Generation. Proceedings of the Third Latin-American Symposium on Fluids Mechanics, Universidad Simón Bolívar, Caracas.