

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACION COMPUTACIONAL DE PERFILES SELIG Y SZ2400  
CON BORDES DE ATAQUE MODIFICADOS**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Stefan Zarea

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Bachiller Juzga P., Jorge A.  
para optar al título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, Junio de 2008



*Caracas, 17 de julio de 2008*

**ACTA**

*Los abajo firmantes miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller:*

**JORGE JUZGA**

*Título:*

**"EVALUACION COMPUTACIONAL DE PERFILES SELIG Y SZ2400 CON BORDES DE ATAQUE MODIFICADOS"**

*Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.*



  
 Prof. Cesar Ferrer  
 Jurado

  
 Prof. José Luis Perera  
 Jurado

Prof. Stefan Zarea  
 Tutor

*"Hacia el 50º Aniversario del 21 de noviembre de 1957, Día del Estudiante"*

## **CATORIA**

Dedico este trabajo a:

Mis Padres Jorge Juzga y Maria Oliva Prieto,

A mis hermanos Johanna Paola, Christian Mauricio y Jean Carlos y

A mi sobrino Christian Andres

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco en forma muy especial a mi Profesor tutor Dr. Ing. Stefan Zarea por proponerme un tema de tesis muy especial sobre perfiles aerodinámicos, por facilitarme el código Visual Foil 4.1, por enseñarme a trabajar y ser responsable, por instruirme con amor y dedicación sobre muchos aspectos de la vida. Aprecié mucho su sentido particular de vivir, su filosofía de servir a los prójimos, es una inspiración para todos los que hemos tenido el placer de trabajar con él.

Son tantos los detalles significativos que tengo que agradecerle a mi Profesor tutor desde el tiempo que le conozco, que faltarían las palabras, le deseo que siga recolectando la mayor felicidad posible en esa tan fructífera vida que lleva.

Al Prof. Julio Segura por haberme facilitado el software ANSYS CFX, por la ayuda en comprenderlo y aplicarlo en el Capítulo 5 de la tesis, por el buen trato y por sus sugerencias en transcurso de la realización de la simulación.

Al Ing. Miguel Baritto, por la eficiente asistencia en el uso del programa ANSYS CFX y por la asesoría acordada.

Al Ing. Julio Aparicio por su colaboración y asesoramiento invaluable.

A mis compañeros de tesis Daniel Trujillo y Jesús Urdaneta por su entusiasta y desinteresada colaboración.

## NOMENCLATURA

$C_L$  : Coeficiente de sustentación

$C_D$  : Coeficiente de arrastre

$C_M$  : Coeficiente de momento

$C_{Lmax}$  : Coeficiente de sustentación máxima

$C_{D(Lmax)}$  : Coeficiente de arrastre para sustentación máxima

$C_{m0}$  : Coeficiente de momento para el ángulo de sustentación nula

$C_{Dmin}$  : Coeficiente de arrastre mínimo

$C_{L(Dmin)}$  : Coeficiente de sustentación para arrastre mínimo

$C_P, c.p$  : Centro de presión

$c$  : Cuerda del perfil

$I_x$  : Momento de inercia respecto al eje x

$I_y$  : Momento de inercia respecto al eje y

$I_{xy}$  : Producto de inercia respecto a los ejes cartesianos

$e_{max}$  : Espesor máximo

$f_{max}$  : Curvatura máxima

$J_o$  : Momento polar de inercia

$Re$  : Numero de Reynolds

$x_c$  : Abscisa de la curvatura máxima del perfil

$xe_{max}$  : Abscisa del espesor máxima del perfil

$xf_{max}$  : Abscisa de la curvatura máxima del perfil

$y_c$  : Ordenada del centroide del perfil

$y_{e_{max}}$  : Ordenada del espesor máximo del perfil

$y_{f_{max}}$  : Ordenada de la curvatura máxima del perfil

$a$  : Angulo de ataque

$a_{max}$  : Angulo de ataque para sustentación máximo

$a_o$  : Angulo de ataque para sustentación nula

$a_D$  : Angulo de ataque para arrastre mínimo

$e = C_L / C_D$  : Fineza aerodinámica

$e_M = (C_L / C_D)_{max}$  : Fineza aerodinámica máxima

$e_{aM} = (C_L / C_D)_{a_{max}}$  : Fineza aerodinámica para sustentación máxima

$a_{aM} = a_{(C_L / C_D)_{max}}$  : Angulo de ataque para la fineza aerodinámica máxima

$A_n$  : Coeficiente enésimo del polinomio de interpolación (del extradós o intradós)

$e_g$  : Error global de polinomios de interpolación

$\rho$  : Densidad del Fluido

$F$  : Fuerza hidrodinámica

$F_D$  : Fuerza de arrastre

$F_L$  : Fuerza de sustentación

$r_f$  : Radio de fuga

$A$  : Area

## INDICE

PORTADA.....	I
RESUMEN.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
NOMENCLATURA.....	V
INDICE.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
1. CAPITULO I: FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE ESTUDIO.....	2
<b>1.1. Planteamiento del tema.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Importancia del estudio.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Objetivos.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Metodología de trabajo.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5. Nociones básicas sobres perfiles aerodinámicos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5.1. Parámetros geométricos principales de un perfil aerodinámico.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5.2. Parámetros aerodinámicos y curvas características.....</b>	<b>5</b>
2. CAPITULO II: ANTECEDENTES Y ESTUDIOS PREVIOS.....	8
<b>2.1 Antecedentes.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Estudios Previos.....</b>	<b>10</b>
3. CAPITULO 3: CARACTERISTICAS AERODINÁMICAS DE LOS PERFILES SERIE SELIG.....	13
<b>3.1 Generalidades Sobre Perfiles de la Serie Selig.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.1 Codificación.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Características Geométricas de los Perfiles Seleccionados.....</b>	<b>14</b>

<b>3.3 Datos Experimentales</b> .....	17
<b>3.3.1 Descripción del túnel de viento</b> .....	17
<b>3.3.2 Tablas de datos Experimentales</b> .....	18
<b>3.4 Evaluación Computacional de la Serie Selig</b> .....	20
<b>3.5 Comparación de la Evaluación Computacional y Experimental</b> .....	41
<b>3.6 Comentarios</b> .....	87
<b>4. CAPITULO 4. EVALUACION COMPUTACIONAL DE PERFILES DE LA SERIE SELIG, SZ2400 Y MODIFICADOS</b> .....	89
<b>4.1 Modificación del Borde de Ataque</b> .....	89
<b>4.2 Evaluación Computacional de los Perfiles SELIG seleccionados</b> .....	90
<b>4.3 Evaluación Computacional del los Perfiles ZAREA</b> .....	91
<b>4.4 Evaluación Computacional del los Perfiles SZ 2400</b> .....	135
<b>4.5. Evaluación Computacional de los Perfiles SZ400m</b> .....	169
<b>4.6 Comparación Entre los Perfiles Selig, SZ 2400 y Modificados</b> .....	174
<b>4.7 Comentarios</b> .....	219
<b>5 CAPITULO 5: SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL FLUJO ALREDEDOR DE DOS PERFILES UTILIZANDO EL PROGRAMA ANSYS CFX</b> .....	221
<b>5.1. Nociones Básicas</b> .....	221
<b>5.1.1. Estructura del Software ANSYS CFX</b> .....	222
<b>5.2. Metodología de Trabajo y Parámetros Establecidos</b> .....	223
<b>5.3. Simulación Computacional del Flujo Alrededor del Perfil S4083</b> .....	231
<b>5.3.1 Simulación computacional del perfil S4083 para Re= 200700</b> .....	231
<b>5.3.2 Simulación computacional del perfil 4083 para Re= 301400</b> .....	237
<b>5.4 Simulación Computacional del Flujo Alrededor del Perfil ZAREA 4083</b> .....	243
<b>5.4.1 Simulación computacional del perfil ZAREA 4083 para Re= 200700</b> .....	243
<b>5.4.2 Simulación computacional del perfil ZAREA 4083 para Re= 301400</b> .....	249



<b>5.5 Evaluación Computacional de los Perfiles S4083 y ZAREA 4083 en ANSYS CFX.</b>	<b>254</b>
<b>5.6 Comparación de la Evaluación Computacional con ANSYS CFX del Perfil S4083.</b>	<b>255</b>
<b>5.6 Comentarios</b> .....	<b>256</b>
<b>6. CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>258</b>
<b>6.1 Conclusiones</b> .....	<b>258</b>
<b>6.2 Recomendaciones</b> .....	<b>259</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>260</b>

## LISTA DE TABLAS

### CAPITULO III

3.2.1 Características Geométricas de la serie Selig .....	14
3.5.1 Comparación de datos experimentales y computacionales perfil S1210.....	41
3.5.2 Comparación datos experimentales y computacionales perfil S4083.....	44
3.5.3 Comparación datos experimentales y computacionales perfil S5010.....	46
3.5.4 Comparación datos experimentales y computacionales perfil S7012.....	48
3.5.5 Comparación datos experimentales y computacionales perfil S6063.....	50
3.5.6 Comparación datos experimentales y computacionales perfil S7055.....	52
3.5.7 Comparación datos experimentales y computacionales perfil S7075.....	55
3.5.8 Comparación datos experimentales y computacionales perfil S8025.....	57
3.5.9 Comparación de datos experimentales y computacionales perfil S8036.....	59
3.5.10 Comparación datos experimentales y computacionales perfil S8052.....	62
3.5.11 Comparación de datos experimentales y computacionales perfil SA7035.....	65
3.5.12 Comparación datos experimentales y computacionales perfil SA7036.....	68
3.5.13 Comparación datos experimentales y computacionales perfil SA7038.....	70
3.5.14 Comparación datos experimentales y computacionales perfil SD6060.....	72
3.5.15 Comparación datos experimentales y computacionales perfil SD7003.....	75
3.5.16 Comparación datos experimentales y computacionales perfil SD7032.....	77
3.5.17 Comparación datos experimentales y computacionales perfil SD7037.....	80
3.5.18 Comparación datos experimentales y computacionales perfil SD7080.....	83
3.5.19 Comparación de datos experimentales y computacionales perfil SD8020.....	85

## CAPITULO IV

4.2.1 Características Geométricas de la serie SELIG seleccionados.....	90
4.3.1 Características Geométricas de los perfiles de la serie ZAREA .....	112
4.4.1 Características Geométricas de la serie SZ 2400.....	135
4.6.1 Comparación S1020 y ZAREA 1020.....	175
4.6.2 Comparación S2046 ZAREA 2046.....	177
4.6.3 Comparación S2050 ZAREA 2050.....	179
4.6.4 Comparación S2060 y ZAREA 2060.....	179
4.6.5 Comparación S2062 y ZAREA 2062.....	181
4.6.6 Comparación S2091 y ZAREA 2091.....	183
4.6.7 Comparación S3002 y ZAREA 3002.....	185
4.6.8 Comparación S3010 y ZAREA 3010.....	187
4.6.9 Comparación S3014 y ZAREA 3014.....	189
4.6.10 Comparación S3025 y ZAREA 3025.....	191
4.6.11 Comparación S4022 y ZAREA 4022.....	193
4.6.12 Comparación S4061 y ZAREA 4061.....	195
4.6.13 Comparación S4062 y ZAREA 4062.....	197
4.6.14 Comparación S4083 y ZAREA 4083.....	199
4.6.15 Comparación S7012 y ZAREA 7012.....	201
4.6.16 Comparación S7055 y ZAREA 7055.....	203
4.6.17 Comparación S8025 y ZAREA 8025.....	205
4.6.18 Comparación S8037 y ZAREA 8037.....	207
4.6.19 Comparación S8038 y ZAREA 8038.....	209

4.6.20 Comparación SZ2471 y SZ2471m.....	211
4.6.21 Comparación SZ2476 y SZ2476m.....	213
4.6.22 Comparación SZ2480 y SZ2480m.....	215
4.6.23 Comparación SZ2499 y SZ2499m.....	217

## CAPITULO V

5.3.1 Parámetros de Simulación perfil S4083 Re=200700.....	231
5.3.2 Parámetros de Simulación perfil S4083 Re=301400.....	237
5.4.1 Parámetros de Simulación perfil ZAREA 4083 Re=200700.....	243
5.4.2 Parámetros de Simulación perfil ZAREA 4083 Re=30 00.....	249
5.5.1 Evaluación Computacional Perfil S4083 Re= 200700.....	254
5.5.2 Evaluación Computacional Perfil S4083 Re= 301700.....	255
5.5.3 Evaluación Computacional Perfil ZAREA 4083 Re=200700.....	255
5.5.4 Evaluación Computacional Perfil ZAREA 4083 Re=301400.....	254
5.6.1 Comparación de los datos experimentales con las evaluaciones computacionales en Visual Foil 4.1, Desing FOIL5.36 y ANSYS CFX.....	257

## LISTA DE FIGURAS

### CAPITULO I

1.5.1 Características geométricas de un perfil genérico.....	5
1.5.2 Curvas características de un perfil aerodinámico c) $C_l/C_d$ , vs. a, d) $C_l, 20 C_d$ y $C_{mvs}$ ..	6
1.5.3 Curvas características de un perfil aerodinámico b) $C_l$ vs. $C_d$ .....	7

### CAPITULO III

3.2.1 Contorno de los perfiles de la serie SELIG.....	15
3.2.2 Características de los perfiles con bajo $Re$ , Coeficiente de momento vs. tipo de modificación.....	16
3.3.1.1 Diagrama del túnel de viento subsónico de baja velocidad UIUC.....	17
3.3.1.2 Fotografía de la entrada del Túnel de viento de UIUC.....	18
3.3.2.1 Gráficas experimentales “Compendio de Datos de Perfiles de Baja Velocidad”.....	19
3.4.1.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S1210, c) Curvas $C_l/C_d$ y d) $C_l$ y $C_d$ vs. Ángulo de ataque del perfil S1210.....	21
3.4.2.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S4083, c) Curvas $C_l/C_d$ y d) $C_l$ y $C_d$ vs. Ángulo de ataque del perfil S4083.....	22
3.4.3.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S5010, c) Curvas $C_l/C_d$ y d) $C_l$ y $C_d$ vs. Ángulo de ataque del perfil S5010.....	23
3.4.4.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S6063, c) Curvas $C_l/C_d$ y d) $C_l$ y $C_d$ vs. Ángulo de ataque del perfil S6063.....	24
3.4.5.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S7012, c) Curvas $C_l/C_d$ y d) $C_l$ y $C_d$ vs. Ángulo de ataque del perfil S7012.....	25
3.4.6.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S7055, c) Curvas $C_l/C_d$ y d) $C_l$ y $C_d$ vs. Ángulo de ataque del perfil S7055.....	26

3.4.7.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S7075, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil S7075.....	27
3.4.8.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S8025, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil S8025.....	28
3.4.9.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S8036, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil S8036.....	29
3.4.10.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil S8052, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil S8052.....	30
3.4.11.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil SA7035, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil SA7035.....	31
3.4.12.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil SA7036, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil SA7036.....	32
3.4.13.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil SA7038, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil SA7038.....	33
3.4.14.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil SD6060, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil SD6060.....	34
3.4.15.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil SD7003, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil SD7003.....	35
3.4.16.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil SD7032, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil SD7032.....	36
3.4.17.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil SD7037, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil SD7037.....	37
3.4.18.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil SD7080, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil SD7080.....	38
3.4.19.- a) Contorno, b) Curvas Polares del perfil SD8020, c) Curvas Cl/Cd y d) Cl y Cd vs. Ángulo de ataque del perfil SD8020.....	39
3.5.1 Comparación de la curvas Cl vs.a de VisualFoil 4.1 y experimental.....	40

## CAPITULO IV

4.2.1 Contornos de los perfiles SELIG seleccionados.....	91
4.2.2.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S1020. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S1020.....	92
4.2.3.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2046. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S2046.. .....	93
4.2.4.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2050. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S2050.....	94
4.2.5.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2060. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S2060.....	95
4.2.6.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2062. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S2062.....	96
4.2.7.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2091. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S2091.....	97
4.2.8.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S3002. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S3002.....	99
4.2.9.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S3010. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S3010.....	100
4.2.10.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S3014. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S3014.....	101

4.2.11.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S3025. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil S3025.....	102
4.2.12.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S4022. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil S4022.....	103
4.2.13.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S4061. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil S4061.....	104
4.2.14.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S4062. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil S4062.....	105
4.2.15.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S4083. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil S4083.....	106
4.2.16.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S7012. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil S7012.....	107
4.2.17.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S7055. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil S7055.....	108
4.2.18.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S8025. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil S8025.....	109
4.2.19.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S8037. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil S8037.....	110



4.2.20.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. $X$ para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S8038. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil S8038.....	111
4.3.1 Contornos de los perfiles ZAREA.....	114
4.3.2.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. $X$ para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ1020. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 1020.....	115
4.3.3.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. $X$ para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 2046. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 2046.. .....	115
4.3.4.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. $X$ para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 2050. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 2050.....	116
4.3.5.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. $X$ para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 2060. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 2060.....	117
4.3.6.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. $X$ para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 2062. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 2062.....	118
4.3.7.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. $X$ para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 2091. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 2091.....	119
4.3.8.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. $X$ para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 3002. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 3002.....	120
4.3.9.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. $X$ para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 3010. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 3010.....	121

4.3.10.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 3014. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 3014.....	122
4.3.11.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 3025. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 3025.....	123
4.3.12.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 4022. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 4022.....	124
4.3.13.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 4061. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 4061.....	125
4.3.14.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 4062. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 4062.....	126
4.3.15.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 4083. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 4083.....	127
4.3.16.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 7012. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 7012.....	128
4.3.17.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 7055. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 7055.....	129
4.3.18.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 8025. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 8025.....	130

4.3.19.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 8037. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 8037.....	131
4.3.20.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil ZAREA 8038. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil ZAREA 8038.....	132
4.4.1 Contornos de los perfiles de la serie SZ2400.....	136
4.4.2.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2470. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2470.....	139
4.4.3.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2471. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2471.....	140
4.4.4.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2472. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2472.....	141
4.4.5.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2473. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2473.....	142
4.4.6.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2474. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2474.....	143
4.4.7.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2475. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2475.....	144
4.4.8.- a) Cp (0° y: a para Clmax) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2476. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2476.....	145

4.4.9.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2477. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2477.....	146
4.4.10.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2478. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2478.....	147
4.4.11.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2479. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2479.....	148
4.4.12.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2480. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2480.....	149
4.4.13.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2481. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2481.....	150
4.4.14.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2482. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2482.....	151
4.4.15.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2483. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2483.....	152
4.4.16.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2484. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2484.....	153
4.4.17.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2485. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2485.....	154

4.4.18.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2486. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2486.....	155
4.4.19.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2487. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2487.....	156
4.4.20.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2488. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2488.....	157
4.4.21.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2489. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2489.....	158
4.4.22.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2490. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2490.....	159
4.4.23.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2491. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2491.....	160
4.4.24.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2492. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2492.....	161
4.4.25.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2493. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2493.....	162
4.4.26.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2494. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2494.....	163

4.4.27.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2495. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2495.....	164
4.4.28.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2496. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2496.....	165
4.4.29.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2497. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2497.....	166
4.4.30.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2498. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2498.....	167
4.4.31.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2499. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2499.....	168
4.5.1 Contornos de los perfiles SZ2400m.....	169
4.5.2.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2470m. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2470m.....	171
4.5.3.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2471m. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2471m.....	172
4.5.4.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2476m. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2476m.....	173
4.5.5.- a) $C_p$ ( $0^\circ$ y: a para $C_{lmax}$ ) vs. X para $Re = 1 E6$ (leer $C_{pmax}$ a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2499m. Met. Panel y Capa Límite.(c) Curvas $C_l/C_d$ y (d) $C_l$ , $C_d$ y $C_m$ vs. Ángulo de ataque del perfil SZ 2499m.....	174

## CAPITULO IV

5.1.1.- Estructura del Software ANSYS CFX.....	222
5.2.1.- Definición de regiones y puntos de control.....	225
5.2.2.- Detalle de la expansión en el borde de ataque del perfil S4083.....	226
5.2.3.- Detalle de la definición de nodos de la malla generada.....	227
5.2.4.-Sensibilidad de la malla.....	228
5.3.1.1.-Líneas de corriente del perfil S4083 con $a = -0.05$ y $Re=200700$ .....	231
5.3.1.2.-Líneas de corriente del perfil S4083 con $a = 4.57$ y $Re=200700$ .....	232
5.3.1.3.- Líneas de corriente del perfil S4083 con $a = 9.15$ y $Re=200700$ .....	232
5.3.1.4.- Distribución de presiones del perfil S4083 con $a = -0.05$ y $Re=200700$ .....	233
5.3.1.5.- Distribución de presiones del perfil S4083 con $a = 4.57$ y $Re=200700$ .....	233
5.3.1.6.- Distribución de presiones del perfil S4083 con $a = 9.15$ y $Re=200700$ .....	234
5.3.1.7.- Distribución de velocidades del perfil S4083 con $a = -0.05$ y $Re=200700$ .....	235
5.3.1.8.- Distribución de velocidades del perfil S4083 con $a = 4.57$ y $Re=200700$ .....	235
5.3.1.9.- Distribución de velocidades del perfil S4083 con $a = 9.15$ y $Re=200700$ .....	236
5.3.2.1.- Líneas de corriente del perfil S5083 con $a = -0.05$ y $Re=301400$ .....	237
5.3.2.2.- Líneas de corriente del perfil S5083 con $a = 4.56$ y $Re=301400$ .....	238
5.3.2.3.- Líneas de corriente del perfil S5083 con $a = 4.56$ y $Re=301400$ .....	238
5.3.2.4.- Distribución de presiones del perfil S4083 con $a = -0.05$ y $Re=301400$ .....	239
5.3.2.5.- Distribución de presiones del perfil S4083 con $a = 4.56$ y $Re=301400$ .....	239
5.3.2.6.- Distribución de presiones del perfil S4083 con $a = 9.17$ y $Re=301400$ .....	240
5.3.2.7.- Distribución de velocidades del perfil S4083 con $a = -0.05$ y $Re=301400$ .....	241
5.3.2.8.- Distribución de velocidades del perfil S4083 con $a = 4.56$ y $Re=301400$ .....	241
5.3.2.9.- Distribución de velocidades del perfil S4083 con $a = 9.17$ y $Re=301400$ .....	242
5.4.1.1.- Líneas de corriente del perfil S5083 con $a = -0.05$ y $Re=200700$ .....	243
5.4.1.2.- Líneas de corriente del perfil ZAREA5083 con $a = 4.56$ y $Re=200700$ .....	244

5.4.1.3.- Líneas de corriente del perfil ZAREA4083 con $a = 9.17$ y $Re=200700$ .....	244
5.4.1.4.- Distribución de presiones del perfil ZAREA 4083 $a = -0.05$ y $Re=200700$ .....	245
5.4.1.5.- Distribución de presiones del perfil ZAREA 4083 $a = 4.56$ y $Re=200700$ .....	245
5.4.1.6.- Distribución de presiones del perfil ZAREA 4083 $a = 9.17$ y $Re=200700$ .....	246
5.4.1.7.- Distribución de velocidades del perfil ZAREA 4083 $a = -0.05$ y $Re=200700$ .....	247
5.4.1.8.- Distribución de velocidades del perfil ZAREA 4083 $a = 4.56$ y $Re=200700$ .....	247
5.4.1.9.- Distribución de velocidades del perfil ZAREA 4083 $a = 9.17$ y $Re=200700$ .....	248
5.4.2.1.- Líneas de corriente del perfil ZAREA 4083 $a = -0.05$ y $Re=301400$ .....	249
5.4.2.2.- Líneas de corriente del perfil ZAREA 4083 con $a = 4.56$ y $Re=301400$ .....	250
5.4.2.3.- Líneas de corriente del perfil ZAREA 4083 con $a = 9.17$ y $Re=301400$ .....	250
5.4.2.4.- Distribución de presiones del perfil ZAREA 4083 $a = 0.05$ y $Re=301400$ .....	251
5.4.2.5.- Distribución de presiones del perfil ZAREA 4083 $a = 4.56$ y $Re=301400$ .....	251
5.4.2.6.- Distribución de presiones del perfil ZAREA 4083 $a = 9.17$ y $Re=301400$ .....	252
5.4.2.7.- Distribución de velocidades del perfil ZAREA 4083 $a = -0.05$ $Re=301400$ .....	253
5.4.2.8.- Distribución de velocidades del perfil ZAREA 4083 $a = 4.56$ $Re=301400$ .....	253
5.4.2.9.- Distribución de velocidades del perfil ZAREA 4083 $a = 9.17$ $Re=301400$ .....	254



# 1. CAPITULO 1: FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE ESTUDIO

## 1.1. Planteamiento del tema

En esta investigación se estudiará computacionalmente la influencia de la modificación del borde de ataque de algunos perfiles de la serie SELIG y de la serie ZAREA 2400 sobre las curvas características aerodinámicas a fin de mejorar los valores del coeficiente de sustentación y de la fineza aerodinámica de los perfiles base.

Para este fin se sustituirá el borde de ataque, extendido sobre aproximadamente 10% de la cuerda, por otras curvas similares a unas parábolas asimétricas que permiten tanto la modificación de la capa límite como la eliminación del peligro de aparición de burbujas, que, como se sabe, conducen a la disminución del coeficiente de sustentación y de la fineza aerodinámica para ciertos números de Reynolds.

La evaluación tanto de los perfiles base como de los perfiles modificados se realizará utilizando el programa de computación disponible VisualFoil 4.1, se utilizarán los programas de computación CFX y DesingFOIL.

## 1.2. Importancia del Estudio

Los perfiles recientemente estudiados por el Prof. M. Selig de la Universidad de Illinois y por el Prof. S. Zarea tienen geometrías parecidas a los perfiles clásicos pero con ciertas particularidades que conllevan a un mejor comportamiento aerodinámico que los perfiles conocidos. La necesidad de los diseñadores de turbomáquinas axiales, de aviones, planeadores, de hélices, etc., de disponer de una mayor variedad de perfiles aerodinámicos ha motivado, de una manera general, la selección del tema señalado en el título de la presente propuesta.

El aporte especial que ofrece este trabajo consiste en la posibilidad de incrementar los valores del coeficiente de sustentación y de la fineza aerodinámica de algunos de estos perfiles aplicando el procedimiento sencillo que consiste en modificarles la geometría del borde de ataque, procedimiento conocido pero poco aplicado en la práctica por necesitarse luego el trazado de las curvas características aerodinámicas de los perfiles modificados, que anteriormente requería mucho tiempo y originaba gastos importantes.

Los métodos computacionales actuales y la disponibilidad de programas específicos permiten el cálculo de los parámetros aerodinámicos de interés aplicativo y el trazado de las curvas características aerodinámicas en forma sencilla y rápida.

En consecuencia actualmente la aplicación del procedimiento de modificación del borde de ataque es relativamente fácil de implementar y la evaluación computacional permite evaluar los resultados y concretar cuáles de los perfiles serie SELIG y serie ZAREA 2400 modificados ofrece nuevos campos de aplicación.

### **1.3. Objetivos**

#### Objetivo principal

El objetivo principal de este estudio consiste en estudiar computacionalmente la influencia de la modificación del borde de ataque de varios perfiles serie SELIG y serie ZAREA 2400 sobre las curvas características aerodinámicas.

#### Objetivos específicos y alcances

El cumplimiento del objetivo principal se logrará paso a paso según los objetivos específicos y los alcances que se mencionan a continuación:

- Seleccionar mínimo 20 perfiles de la serie Selig y Zarea 2400, considerados como perfiles base, que serán estudiados.
- Trazar las curvas características de los perfiles base seleccionados.
- Modificar los bordes de ataque de estos perfiles según las indicaciones del Prof. guía.
- Calcular las características geométricas de los perfiles modificados, en la versión final (área, centro de masa, espesor máximo, abscisa del espesor máximo, flecha máxima, abscisa de la flecha máxima y momentos de inercia).
- Trazar las curvas características de los perfiles modificados.
- Interpretar los resultados comparando las curvas características aerodinámicas de los perfiles base y modificados.

## 1.4. Metodología de Trabajo

Para lograr los objetivos arriba mencionados se realizaron varias actividades específicas que se numeran a continuación:

- Recopilación y estudio de la bibliografía especializada.
- Aprendizaje en el manejo de los programas VisualFoil 4.1, Grapher, CFXy DesingFoil.
- Selección los perfiles base SELIG y ZAREA 2400.
- Trazado computacional de las curvas características aerodinámicas de los perfiles base.
- Modificación los bordes de ataque de los perfiles base utilizando las curvas sugeridas por el Prof. tutor o de su propia selección.
- Cálculo de los parámetros aerodinámicos y trazado de las curvas características de las mejores versiones de los perfiles modificados.
- Cálculo de los parámetros geométricos de los perfiles estudiados.
- Comparación de las curvas características de los perfiles modificados y de los perfiles base.
- Formulación de las conclusiones sobre el procedimiento de modificaciones del borde de ataque implementado.

## 1.5. Nociones Básicas Sobres Perfiles Aerodinámicos

### 1.5.1. Parámetros geométricos principales de un perfil aerodinámico

En las figuras 1.5.1, muestran los contorno de un perfil aerodinámico genérico. Se señalan y se identifican los parámetros geométricos principales:

- cuerda,  $c$ , del perfil
- extradós,
- intradós,
- esqueleto,
- borde de ataque,
- borde de fuga,
- espesor,  $e(x)$  ó  $t(x)$
- espesor máximo,  $e_{\max}$  ó  $t_M$
- abscisa del espesor máximo,  $X_{eM}$

- flecha,  $f$
- flecha máxima,  $f_{\max}$  ó  $f_M$
- abscisa de la flecha máxima,  $Xf_M$

Fig.1.5.1 Características geométricas de un perfil genérico

### 1.5.2. Parámetros aerodinámicos y curvas características

La interacción entre la corriente de un fluido de densidad,  $\rho$ , y la velocidad no perturbada,  $V_0$ , y un elemento de ala de envergadura unitaria y caracterizada por un perfil de cuerda,  $c$ , y área  $A$  se expresa por la fuerza de sustentación,  $F_L$ , de arrastre,  $F_D$ , y el momento  $M$  mediante las formulas clásicas:

$$F_L = C_L \frac{\rho}{2} V_0^2 A \quad (1.1)$$

$$F_D = C_D \frac{\rho}{2} V_0^2 A \quad (1.2)$$

$$M = C_M \frac{\rho}{2} V_0^2 A \quad (1.3)$$

Los coeficientes de sustentación,  $C_L$ , de arrastre,  $C_D$ , y de momento,  $C_M$ , dependen del ángulo de ataque del fluido,  $\alpha$ , del numero de Reynolds del flujo,  $Re$  y de la rugosidad,  $k$ , del ala, considerada de envergadura infinita.

$$C_i = C_i (\alpha, Re, K); \quad i = L, D, m \quad (1.4)$$

La determinación de las expresiones concretas de los coeficientes  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  y  $C_L / C_D$  en función del ángulo de ataque, considerando el número de Reynolds y la rugosidad como parámetros, se realiza, usualmente, de forma experimental.

Existen métodos analíticos aproximados para el cálculo del coeficiente  $C_L$  y métodos semi-empíricos para  $C_D$  (por ejemplo la formula de Squire y Young).

En las ultimas tres décadas se han desarrollado métodos computacionales que permiten la determinación de los valores de estos coeficientes con una precisión aceptable.

La representación grafica de las funciones  $C_L$  vs.  $\alpha$ ,  $C_D$  vs.  $\alpha$ ,  $C_M$  vs.  $\alpha$ ,  $C_L / C_D$  vs.  $\alpha$  y  $C_L$  vs.  $C_D$  son denominadas: curvas características aerodinámicas un perfil. En la mayoría de las fuentes bibliográficas estas curvas se ofrecen para un valor del número de Reynolds y una determinada rugosidad. Recientemente hay resultados para 2-3 valores de Reynolds y  $k$ .

En las figuras 1.5.1 a 1.5.3 se presentan ejemplos genéricos de las curvas características aerodinámicas.

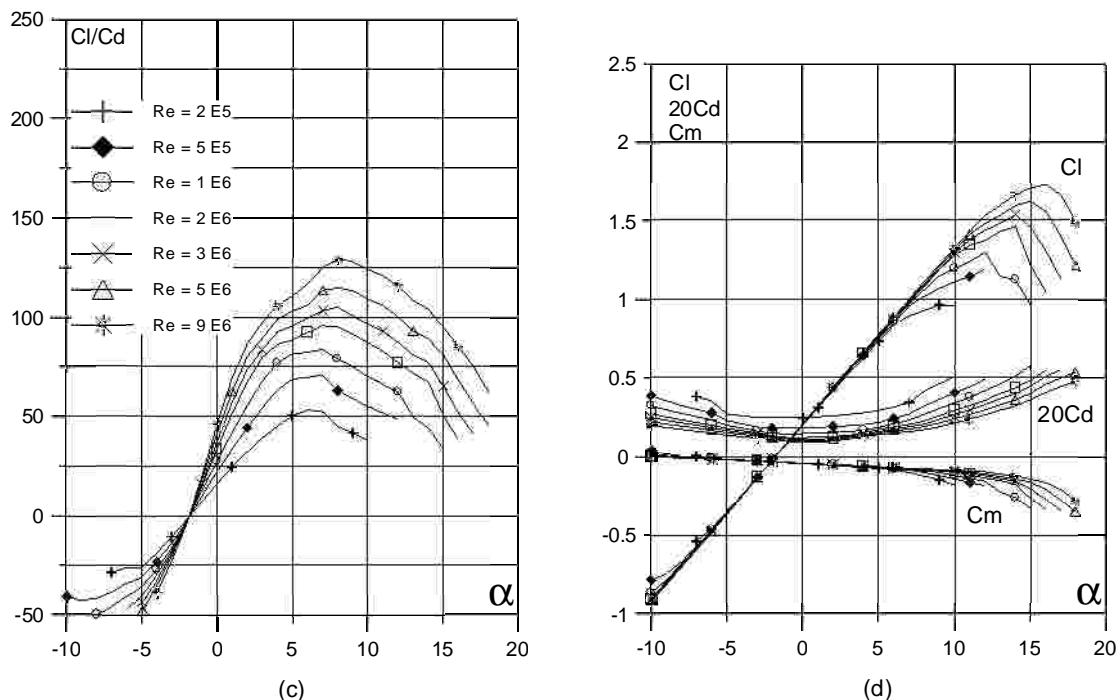


Fig.1.5.2 Curvas características de un perfil aerodinámico c)  $C_L/C_D$ , vs.  $\alpha$ , d)  $C_L, 20 C_D$  y  $C_M$  vs.  $\alpha$

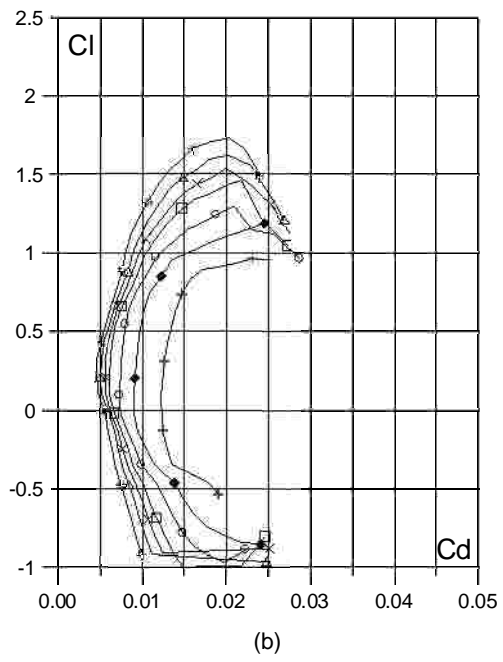


Fig.1.5.3 Curvas características de un perfil aerodinámico b)  $C_l$  vs.  $C_d$

## 2. CAPITULO 2: ANTECEDENTES Y ESTUDIOS PREVIOS

### 2.1 Antecedentes

En la literatura especializada se ha señalado desde varios decenios que el borde de ataque de un ala de avión tiene una influencia significativa sobre su comportamiento aerodinámico. La modificación del borde de ataque de un ala de avión puede ocurrir de una manera descontrolada, por ejemplo como consecuencia del incremento de la rugosidad o la formación de una o varias capas de hielo, o como consecuencia del cambio intencional de este elemento del ala. La modificación intencional puede realizarse por dos vías distintas: una, consiste en utilizar perfiles aerodinámicos caracterizados por una geometría específica que asegure la localización de la zona de depresión máxima en una determinada zona; la segunda vía se refiere al cambio solamente del borde de ataque de un determinado perfil a fin de mejorar su comportamiento aerodinámico. Este último procedimiento representa el objetivo general de la presente investigación. Para orientar nuestra investigación se ha revisado la bibliografía específica reflejada en las 47 referencias, por ejemplo los libros básicos: Abbott, H.I y Von Doenhoff, A.E. 1959, Clancy, L. 1975, Kuethe, A. M. y Chow, ch. 1979, Miley, S. J. 1982, Milne-Thompson, L. M. 1968, Riegels, W. 1965, Von Karman, T., Burgers, J.M. 1963, Van Dyke, M. 1982. Para la evaluación computacional de los perfiles se cuenta con valiosos libros especializados: Anderson, J. 1995, Ashley, H., Hafez, M., Oshima, K. 1995, Hanley, P. 1989, Katz, J., Plotkin, A. 1991, Moran, J. 1984. También se consultaron artículos recientes de revistas de mecánica de fluidos y aeronáutica y de tesis, que se comentan a continuación.

Normalmente en la literatura especializada el desprendimiento de la capa límite y del flujo, fenómenos que en ingles se denominan “stall”, se asoci

perfil.

Para ángulos de ataque grandes, el desprendimiento de capa límite y del flujo (stall) se puede producir empezando inclusive desde el borde de ataque las alas de aviones (Anderson, S. B. 1978). Algo similar aparece en rotores de turbomáquinas, trenes, camiones, automóviles, etc. (Miyakawa, J. 1993, Takao, K. et al, 1993).

Para controlar la separación del flujo, en estas condiciones, el borde de ataque del perfil (en cada una de las secciones transversales del ala) se inclina hacia abajo en comparación con la posición normal, original, del perfil (Anderson, J. y Barlow, J. B. 1979).

Se conocen tres tipos de desprendimiento o separación del flujo en la zona del borde de ataque y la aparición de las burbujas como consecuencia de cambios bruscos en la estructura de la capa límite correlacionados además con el número de Reynolds y la curvatura del borde originándose una disminución brusca y significativa del coeficiente de sustentación (Van den Berg, B.1981, Chaudrasekhara, M.S., Greenblatt, D. Wyganski, I., 2003; Grohsmeyer, S. P. 1990).

El efecto de las capas de hielo, y la rugosidad que introducen, influyen, sobre la formación de burbujas y el incremento de las mismas, produciendo un incremento de la separación del flujo, de la fuerza de arrastre y de la disminución importante de la fuerza de sustentación (Bragg, M. B. y Klodadoust, A. 1992, Huebsch, W. W. 2002).

Se ha desarrollado métodos y códigos para identificar a formación de burbujas (Hanley, P.,1989, Henne, P. (ed.). 1990, Kutler, P. 1983, Rubbert, P., Tinoco, E. 1983).

La evaluación del efecto del borde de ataque ha sido una preocupación para los estudiosos del flujo supersónico (Carlson,H., Mack,R. 1978).

El mejoramiento del comportamiento aerodinámico de los perfiles se ha buscado obtenerlo, adoptando restricciones específicas de diseño. (Campbell. R., Smith, L., Mineck, R. 1992, Lissaman, P. 1983).

Una clase de nuevos perfiles ha sido generada con el método ideado por Prof. Selig, M. y la información aparece en el libro Airfoil at Low Speed, 1989, de su autoría y en la publicación Summary of Low Speed of Airfoil Data (Selig, M. et al 1995).

Distintas clase de nuevos perfiles aerodinámicos han sido trazadas y se ha realizado la evaluación experimental o computacional por el Prof. Zarea y sus colaboradores (Figueira, N. J. y Vilaseca, U. M., 1981, Getan, E., 1981, Pantin, A. M. y Rojas, H., 1978, Pelaez, U. F. A., 1985, Rodriguez, R. J. E., 1978, Rodríguez, I., 1983, Martins, F. y Montoya, L. J. L., 1991, ZAREA, S., 1995, Zarea, S., Irausquin. 2002, Zarea, S., Irausquin, Leañes, E. 2003).

La evaluación computacional de la influencia del borde de fuga de los perfiles ZAREA ha sido realizada por Aparicio, G. J. A., 2006. La influencia de la rugosidad sobre perfiles ZAREA ha sido estudiado analíticamente (Zarea, S. 2001) y la evaluación experimental de la influencia del



modificación del borde de ataque de 3 perfiles SZ 1500 ha sido documentada en las memorias del V Congreso Iberoamericano de Ingeniería (Zarea, S., Irausquin. 2002).

## **2.2 Estudios Previos**

En la literatura se reportan una gran variedad de métodos para el diseño de perfiles aerodinámicos de bajo número de Reynolds para flujo incomprensible que es el tema que nos ocupa.

El diseño de este tipo perfiles aerodinámicos ha pasado por varias etapas, en una fase inicial las familias de perfiles fueron creadas sin considerar formulaciones analíticas sino basadas en alguna institución, asumiendo por así decirlo que las propiedades del fluidos eran “mágicas”.

En la siguiente etapa de complejidad los diseñadores no especificando la forma del perfil sino la distribución de presiones, observaron que modificando propiedades semi-analíticas se obtenían resultados favorables respecto a la sustentación, el punto de transición y la separación.

En una etapa posterior ejemplificada por Liebeck, se definía la distribución de presiones para encontrar una alta sustentación o baja resistencia según fuera los requerimientos, considerando los efectos de la capa límite, desarrollados la geometría de los perfiles por métodos inversos.

Las modernas técnicas computacionales han permitido un mejor entendimiento y cuantificación del comportamiento de la capa límite haciendo posible el diseño de perfiles “hecho a la medida” para condiciones de vuelo particulares, ejemplo de esto es el perfil The BoAR 80 (McMaster et al. 1981) que fue diseñado para un nuevo planeador ultra ligero, que requería alta sustentabilidad.

Existen varios investigadores de una manera analítica estudiado la optimización de la geometría de perfiles manipulando funciones matemáticas que representan el contorno del perfil, con el fin de mejorar la eficiencia de los mismos (aumentar el coeficiente de sustentación y disminuir el coeficiente de arrastre) (Wu Li, Sharon Padula, and Luc Huyse, 2001), (Hee-Khiang Ng, 2005). (Dirk Büche, 2002) (Song, Wenbin, 2003) como el desarrollo de algoritmos genéticos paralelos (Doorly D J, 1997)

Varias investigaciones han demostrado la utilidad de CFD para evaluar las características aerodinámicas de perfiles aerodinámicos (Eppler, Richard. 1990) (Somers, 1999), (Selig, 2001),

comprobando para muchos casos los resultados obtenidos computacionalmente presentan diferencias de hasta un 15% respecto a los reportados en túneles de viento.

Se han realizado investigaciones aplicando CFD a la predicción de la formación de burbujas en la capa límite laminar y su influencia en el comportamiento aerodinámico del perfil (Krumbein, A., 2008), en el control de la separación en perfiles de alta sustentabilidad (Schatz, Markus. 2007).

El diseño de perfiles se puede hacer de distintas maneras; todos los procedimientos pueden ser reunidos en cinco clases: métodos empíricos, métodos analíticos, métodos computacionales, métodos híbridos y métodos especiales.

El primer método que se ha utilizado es el método empírico que se basa en trazar contornos similares a las alas de los pájaros o a la de los peces. Con las alas que se construían con este tipo de perfiles se realizaban estudios en túneles de viento midiendo las fuerzas y momentos aerodinámicos, además se efectuaba el cálculo de los coeficientes característicos aerodinámicos (de sustentación, de arrastre y de momentos). El trazado de las curvas características  $C_L$  vs  $\alpha$ ,  $C_D$  vs  $\alpha$ ,  $C_M$  vs  $\alpha$ , y  $C_L/C_D$  vs  $\alpha$  permitía evaluar las posibles aplicaciones de estos perfiles. En los casos cuando la forma de las curvas características y sobre todo los valores máximos de los coeficientes  $C_L$  y de fineza  $C_L/C_D$  no eran altos ( $C_L < 1.5$ ;  $C_L/C_D < 50$ ) se procedía a una modificación empírica de la forma geométrica del perfil del ala a fin de mejorar el comportamiento aerodinámico. La optimización de cada uno de estos perfiles empíricos se realizaba mediante el conocido procedimiento de ensayo y error.

A fin de satisfacer las exigencias de las industrias de la aviación y aleccionadas para la industria como las turbomáquinas se han desarrollado en orden cronológico métodos analíticos. Existen dos orientaciones: métodos analíticos para resolver problemas inversos o indirectos y métodos para resolver problemas directos.

Los métodos inversos consisten en determinar la geometría del perfil suponiendo o no el cumplimiento de ciertas condiciones o restricciones de naturaleza aerodinámica o de resistencia de materiales.

Los métodos directos se refieren a la determinación del campo de velocidades y de presiones alrededor de un perfil cuya geometría es conocida o impuesta.

En los procedimientos analíticos para resolver problemas directos se efectúa el estudio del flujo alrededor de un perfil de geometría conocida; este análisis se puede realizar utilizando una transformación conforme de una manera general o de una forma especial, lográndose normalmente una solución aproximada pero con alto grado de precisión. El procedimiento clásico de solución de estos problemas se refiere al uso de la función conforme de Theodorsen y sus variantes mejoradas; a veces se aplica la transformación conforme de Von Mises. Otro procedimiento se basa en la serie de Fourier o también se utiliza con mucha frecuencia el método de las singularidades.

Los métodos computacionales tienen la particularidad que se pueden aplicar tanto a fluido ideal como a fluido real. Este procedimiento es el más utilizado en la actualidad debido a la existencia de programas computacionales comerciales y a la disponibilidad de equipos de computación que aseguran gran velocidad de cálculo y procesamiento variado de la información y trazados de gráficos.

La optimización aerodinámica de un perfil requiere de estudio iterativo con procedimientos computacionales operando con pequeñas modificaciones en la geometría del perfil. El procedimiento es similar al caso del método empírico con la diferencia que la evaluación aerodinámica de las modificaciones se obtiene con mayor facilidad por vía computacional.



### 3. CAPITULO 3: CARACTERISTICAS AERODINÁMICAS DE LOS PERFILES SERIE SELIG

En este capítulo se presentan las curvas aerodinámicas características de 19 perfiles de la serie Selig evaluados computacionalmente en el programa VisualFoil 4.1, comparados con los resultados experimentales documentados en la colección de libros “Compendio de Datos para Perfiles de Baja Velocidad” volúmenes 1,2,3 y “Mediciones Aerodinámicas en Túnel de Viento de Seis Perfiles Usados en Pequeñas Turbinas de Aire”, publicados por la Universidad de Illinois Urbana Champaign (UIUC) en Estados Unidos desde Junio de 1995 a Enero de 2003.

#### 3.1 Generalidades Sobre Perfiles de la Serie Selig

Los perfiles seleccionados fueron diseñados en el Departamento de Aeronáutica e Ingeniería Astronáutica, Laboratorio de Investigaciones de Aerodinámica Subsónica de la UIUC.

Esta serie de perfiles fue desarrollada por un equipo: James J. Guglielmo, Andy P. Broeren y Philippe Giguère liderado por el Ingeniero Dr. Michael S. Selig.

Estos perfiles fueron diseñados para flujo subsónico incompresible para aplicaciones de velocidades bajas, como lo son los aeromodelos de vuelo libre, planeadores, aeromodelismo R/C, alabes de pequeñas turbinas de viento, avionetas, etc.

La base de datos perfiles de la UIUC registra las coordenadas de más de 1500 perfiles de dominio público de los cuales 57 perfiles son de la autoría exclusiva Prof. Michael. Selig, 3 diseñados por el Prof. Michael Selig en conjunto con Ashok Gopalarnham, 19 por el Prof. Michael Selig en conjunto con J.F Donovan.

##### 3.1.1 Codificación

Los perfiles de esta serie están identificados por una o dos letras correspondientes al apellido de su autor(s) seguido de 3 o 4 números:

S xxxx perfiles cuyo autor principal es el Dr. Michael Selig

SD xxxx perfiles cuyos autores son Selig-Donovan

SA xxxx perfiles cuyos autores son Selig-Ashok

SG xxxx perfiles cuyos autores son Selig-Giguère

### 3.2 Características Geométricas de los Perfiles Seleccionados

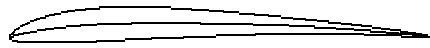
De la serie Selig y colaboradores se eligieron 19 perfiles: S4083, S6063, S7012, S7055, S7075, SA7035, SA7036, SA7038, SD7003, SD7037, SD7080, SD7032, S5010, SD6060, SD8020, S8025, S1210, S8036 y S8052 con el fin de estudiar los perfiles más representativos de acuerdo a su aplicación.

Se presenta el contorno de cada perfil según las coordenadas de la base de datos de UIUC; clasificado según su aplicación, fig. 3.2.1 y la tabla de características geométricas correspondientes (tabla 3.2.1)

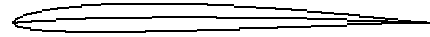
Tabla 3.2.1 Características Geométricas de la serie Selig

Perfil	E.max (%c)	x- E.max (%c)	Fmax(%c)	x-Fmax (%c)	MI (c/4)	Area c.u.
S1210	11.87	0,2320	7.20	0,50	-0.250	0.0653
S4083	9.22	0,2320	3.05	0,3756	-0.060	0.0491
S5010	9.83	0,2871	2.21	0,3159	-0.07	0.0604
S6063	7.05	0,2871	1.43	0,4063	-0.020	0.0453
S7012	8.75	0,2871	2.02	0,3756	-0,068	0.0551
S7055	10.50	0,3159	3.55	0,3756	-0.068	0.0702
S7075	9.22	0,2871	3.05	0,4686	-0.094	0.0609
S8025	8.00	0,232	0.49	0,1812	-0.003	0.0484
S8036	16.00	0,3454	1.89	0,3454	-0.030	0.1075
S8052	11.89	0,3454	1.60	0,3756	-0.020	0.0787
SA7035	9.20	0,2871	2.80	0,4063	-0.078	0.0601
SA7036	9.20	0,2871	2.80	0,4063	-0.085	0.0602
SA7038	9.20	0,2871	3.30	0,43733	-0.085	0.0603
SD6060	10.37	0,3454	1.84	0,3756	-0.039	0.0690
SD7003	8.51	0,2591	1.46	0,3454	-0.035	0.0536
SD7032	10.0	0,2871	3.7	0,4063	-0.098	0.0644
SD7037	9.20	0,2871	3.02	0,4063	-0.085	0.0606
SD7080	9.15	0,2871	2.48	0,4063	-0.050	0.0606

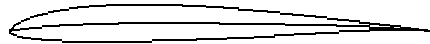
Planeadores



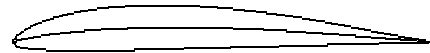
S4083



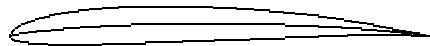
S6063



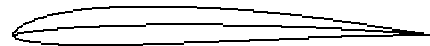
S7012



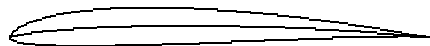
S7055



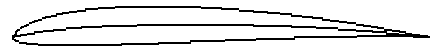
S7075



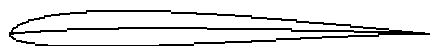
SA7035



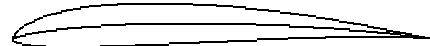
SA7036



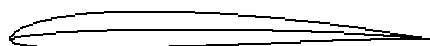
SA7038



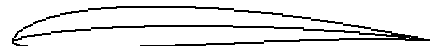
SD7003



SD7037

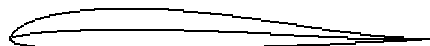


SD7080



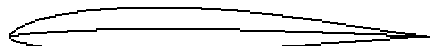
SD7032

Flying Wings



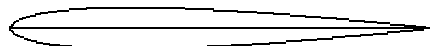
S5010

Slope Racers

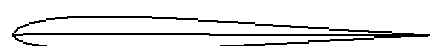


SD6060

Tail Sections

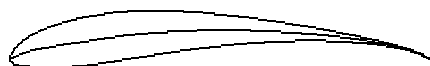


SD8020



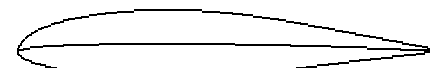
S8025

Cargo Planes Heavy Lift

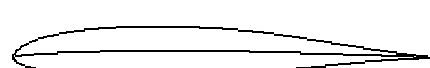


S1210

Powered Aircraft



S8036



S8052

Fig. 3.2.1 Contorno de los perfiles de la serie SELIG

De la selección de perfiles los más conocidos por su aplicación son los siguientes:

El perfil S1210 fue diseñado para competencias de modelos de ultra sustentación como es la SAE Aero-Desing Competition,

La filosofía de diseño empleada para este perfil involucra el efecto favorable de la concavidad en la recuperación de la presión y aumento de la sustentación, esta hipótesis esta basado en la comparación de la información obtenida de los perfiles FX 63-137 y M06-13-18, que se esquematizan en la figura 3.3.1.

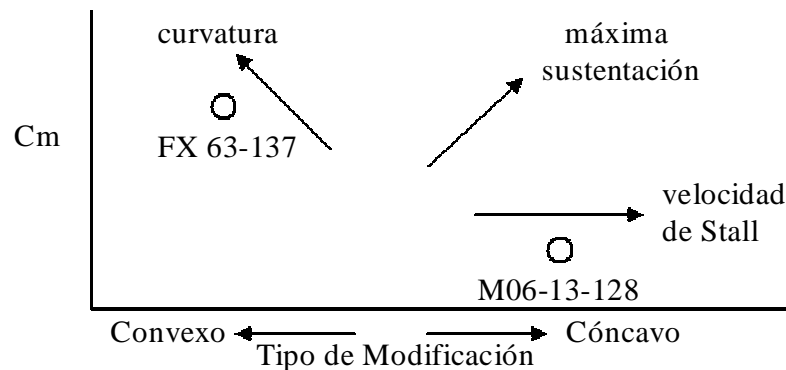


Fig. 3.2.2 Características de los perfiles con bajo Re, Coeficiente de momento vs. tipo de modificación

En la fig. 3.2.2 el momento de inercia es graficado en función del tipo de modificación del extradós entonces a medida q el perfil es mas cóncavo y el momento de inercia se incrementa aumenta la sustentación máxima (Selig, M. 1995).

El perfil 4083 fue diseñado para competencias de aeromodelos R/C de despegue manual, en condiciones de vuelo de baja velocidad con moderadas velocidad de viento. Los planeadores R/C con despegue manual suelen volar a números de Reynolds alrededor de 80.000. En condiciones de vuelo tipo crucero este perfil presenta mejores prestaciones respecto a dos de los perfiles más populares en es tipo de aplicación el SD7037 y E387. (Selig, M. 1995)

El perfil S5010 diseñado para ala voladora, donde el momento de volteo cerca de cero es deseable, comparado con el perfil 7012 el rango de sustentación es similar mientras que el arrastre es ligeramente mayor.

El perfil S6063 7% de espesor es un perfil delgado que pertenece a la familia SD6060, SD6061, S6062 y S6063, este perfil presenta una de las mediciones de arrastre más bajas de los perfiles evaluados por UIUC para  $Re=3000000$  (Selig, M. 1995).



El perfil S7012 diseñado para planeadores F3B fue concebido como una mejora del perfil RG15 considerado en competencias como óptimo, de tal forma de disminuir el arrastre. (Selig, M, 1995)

El S7075 fue diseñado como un aeromodelo R/C de planeo termal.

El S8025 de 8% de espesor ligeramente curvo fue diseñado para colas horizontales, particularmente como estabilizadores (Selig, M. 1996).

El S8036 fue diseñado par el aeromodelo motorizado Top-Flite P-47 por sus dos importantes mejoras un moderado espesor (16%) y un ajuste adecuado para el stall (Selig, M. 1997).

EL S8052 fue diseñado para cumplir los requerimientos las competencias Quickie 500 (Q-500) como una mejora del R140, popularmente utilizado por los entusiastas aficionados a esta competencia, con un incremento del coeficiente de sustentación máximo de 0.35 respecto al perfil antes mencionado (Selig, M. 1997).

Los perfiles SA7035, SA7036 y SA7038 son versiones mejoradas del SD7037 popularmente conocido en las competencias Unlimited Thermal Soaring Competition (Selig, M. 1997).

### 3.3 Datos Experimentales

#### 3.3.1 Descripción del túnel de viento

Los datos experimentales provienen de modelos evaluados en túnel de viento del Departamento de Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica de la Universidad Illinois de Urbana-Champaign, USA. Fíg 3.3.1.1 y Fíg 3.3.1.2.

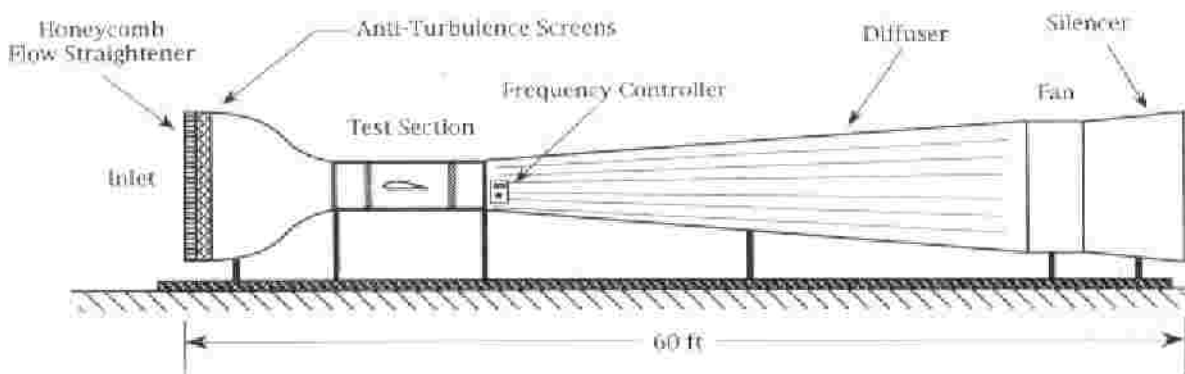


Fig. 3.3.1.1 Diagrama del túnel de viento subsónico de baja velocidad UIUC



Fig. 3.3.1.2 Fotografía de la entrada del Túnel de viento de UIUC

El túnel de viento empleado en la UIUC es del tipo de corriente abierta con relación de contracción 7:5:1, de sección rectangular de medición 2.8 x 4.0 pies, con un rango de velocidades de hasta 160 mph.

Para condiciones de baja velocidad y número de Reynolds se requieren mediciones en rangos de tiempo reducido, para determinar adecuadamente pequeñas fluctuaciones, por lo cual todas las variables (presión dinámica, presión total, levación, ángulo de ataque, posición coordenadas x,y y la temperatura) fueron medidas simultáneamente por un sistema de adquisición de data controlada por un computador en forma automatizada (Selig, M. 1995).

La información obtenida del túnel de viento de UIUC fue validada por la comparación con las mediciones del (LTPT) Túnel de presión de baja turbulencia del Centro de Investigaciones de la NASA Langley. (Selig, M, 1997).

### **3.3.2 Tablas de datos Experimentales**

Las tablas de comparación 3.5.1 a 3.5.19 contienen los resultados experimentales de referencia, los cuales se tomaron de las curvas experimentales, Fig. 3.3.2.1 ajustada numéricamente por medio de la interpolación de los datos numéricos documentados, obteniendo así, valores enteros de ángulo de ataque y número de Reynolds, todo esto con el fin de facilitar su visualización, interpretación, y comparación con gráficas similares existentes en la literatura especializada.

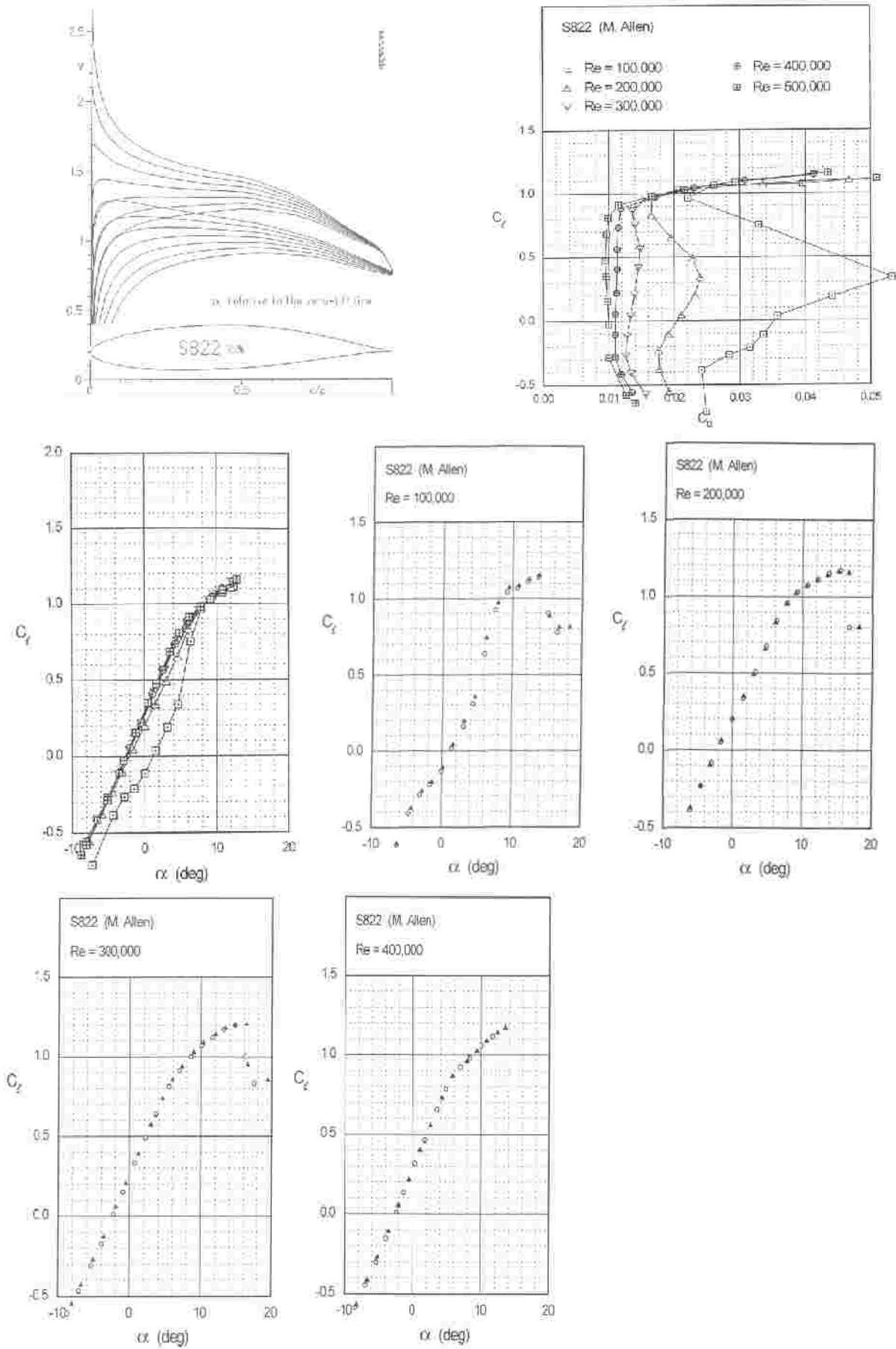


Fig.3.3.2.1 Gráficas experimentales “Compendio de Datos de Perfiles de Baja Velocidad”

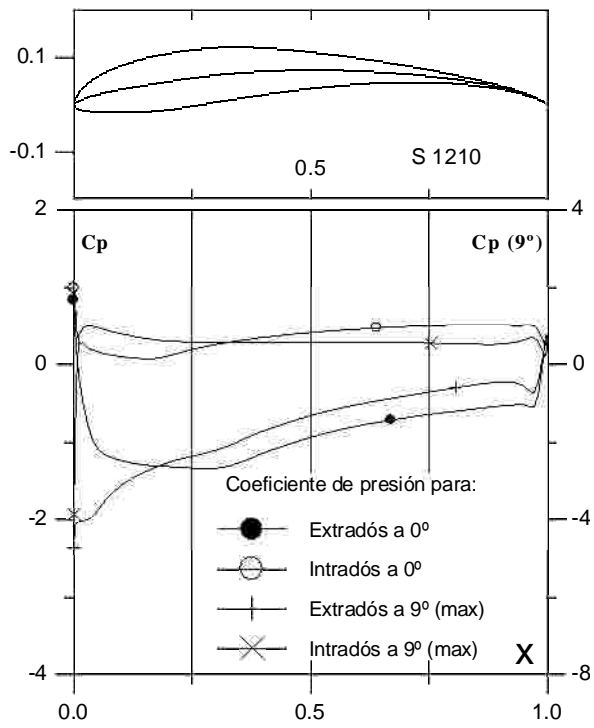
### 3.4 Evaluación Computacional de la Serie Selig

Los 19 perfiles antes descritos se evaluaron por medio del código Visual Foil 4.1 que utiliza el método combinado panel y capa límite para ángulos de ataque de 0 grados a 20 grados y  $Re=60.000, 100.000, 150.000, 200.000, 300.000, 400.000$  y  $50000$  respectivamente.

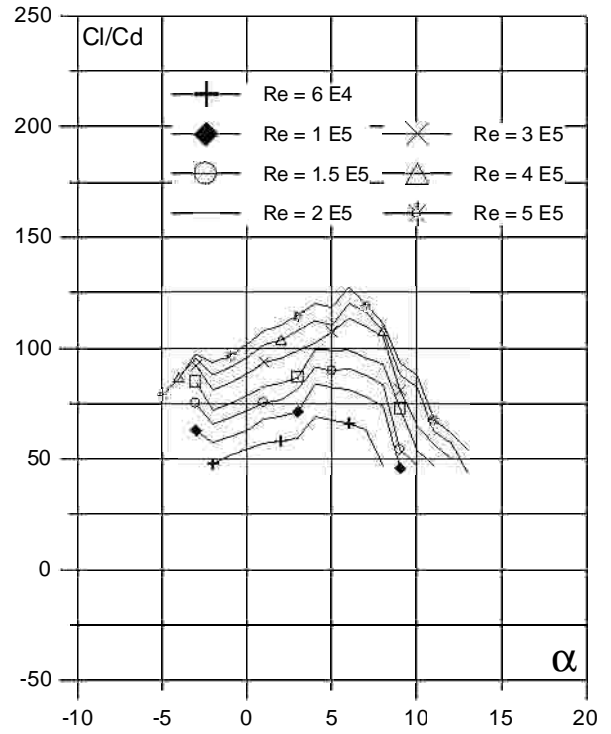
Las figuras 3.4.1 a 3.4.19 contienen las curvas características computacionales.

Para cada uno de los perfiles, en una hoja, se han graficado: el contorno del perfil, el coeficiente de presión  $C_p$  vs.  $X$  para dos ángulos de incidencias características:  $\alpha=0^\circ$  y  $\alpha$  correspondiente al valor máximo del coeficiente de sustentación,  $C_L$ ; en un segundo gráfico, a la derecha, se muestra la familia de curvas de la fineza aerodinámica vs. ángulo de incidencia. También se trazó las curvas polares  $C_L$  vs.  $C_D$  y las curvas  $C_L$  vs.  $\alpha$  y  $C_D$  vs.  $\alpha$ , para los mismos números de Reynolds.

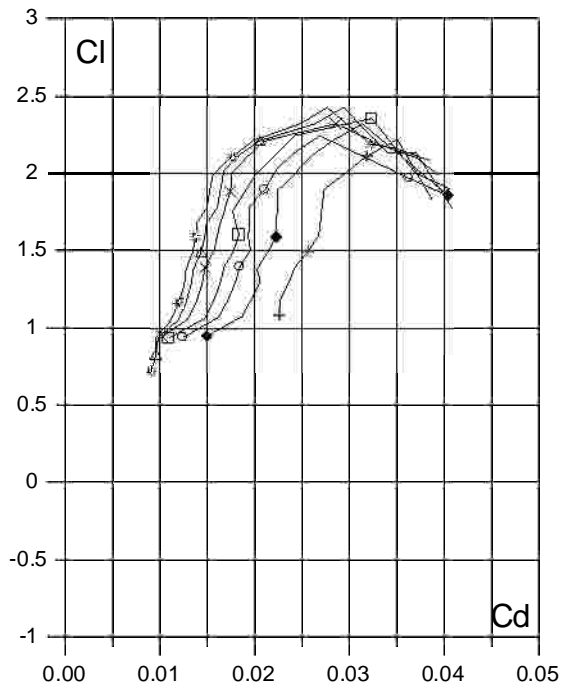
Los resultados de  $C_l$ ,  $C_d$  y fineza aerodinámica que se obtuvieron se restringieron al rango de 0 grados hasta el ángulo para el  $C_l$  máximo.



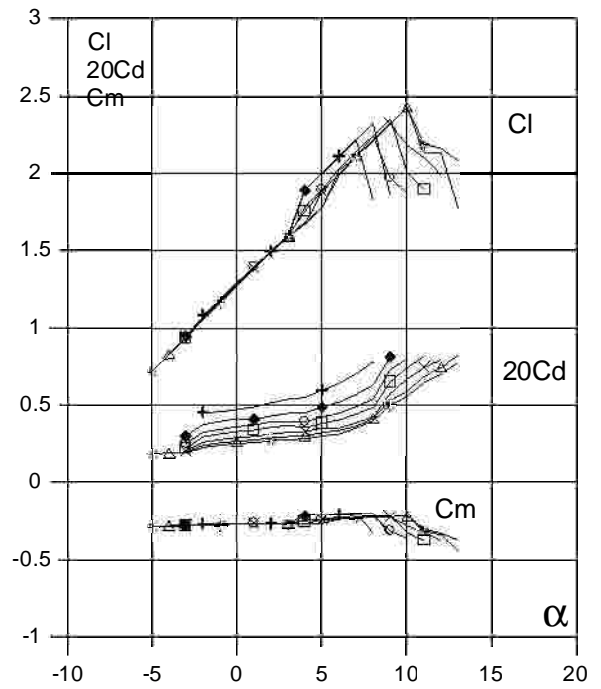
(a)



(c)



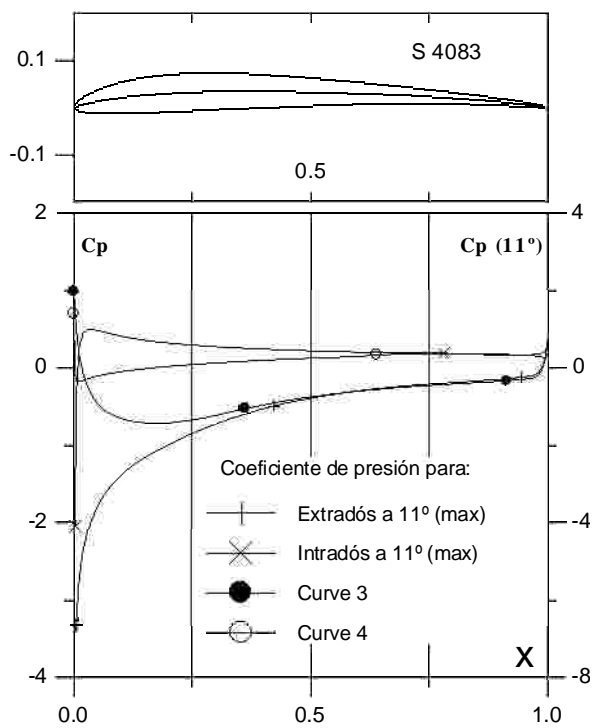
(b)



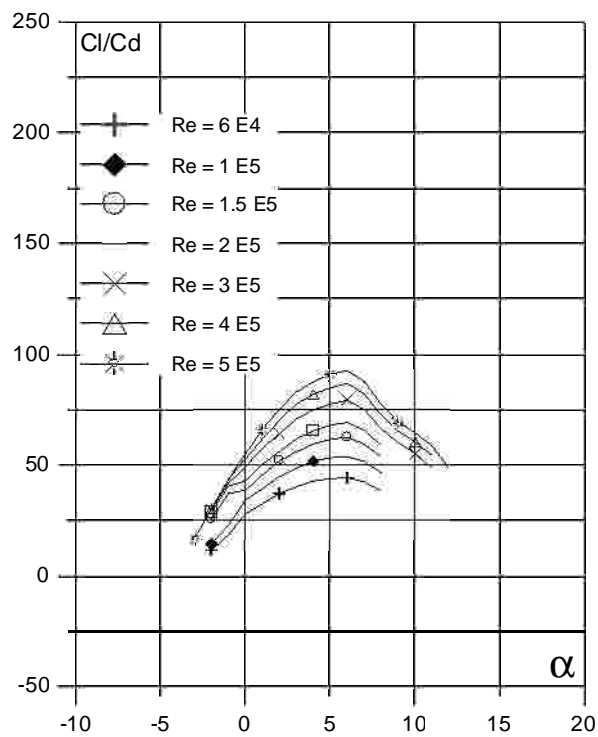
(d)

Fig. 3.4.1. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 \text{ E}5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 1210. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

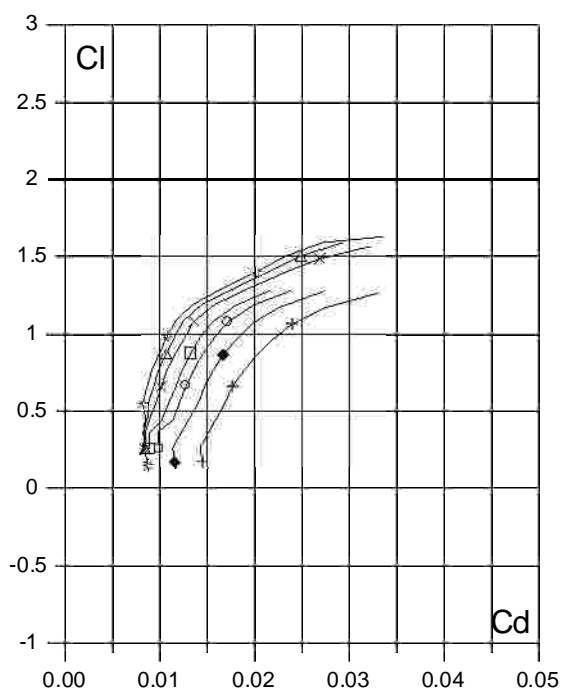
Fig. 3.4.1. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S 1210.



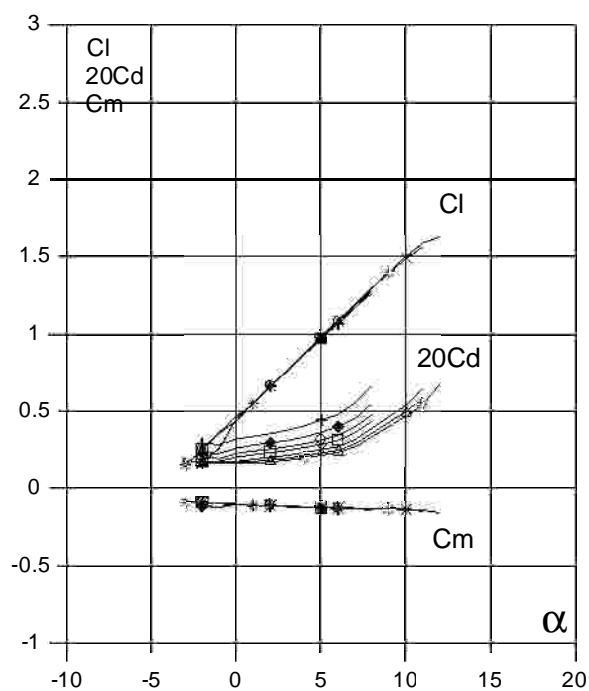
(a)



(c)



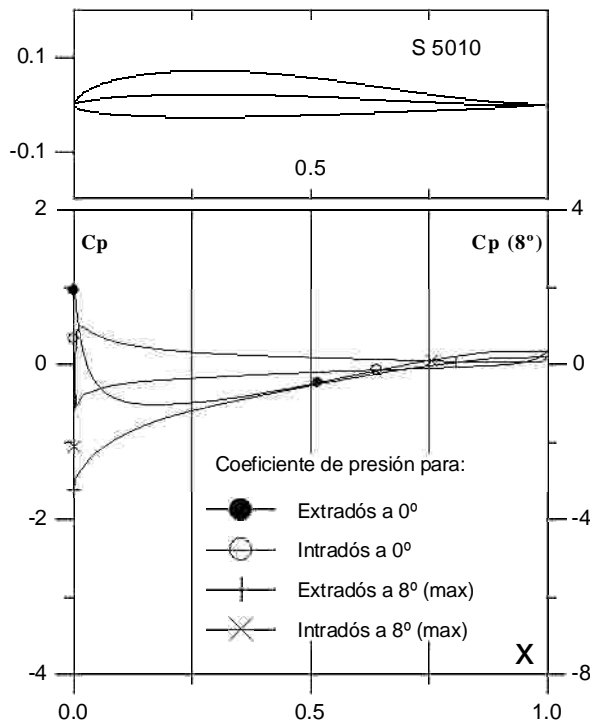
(b)



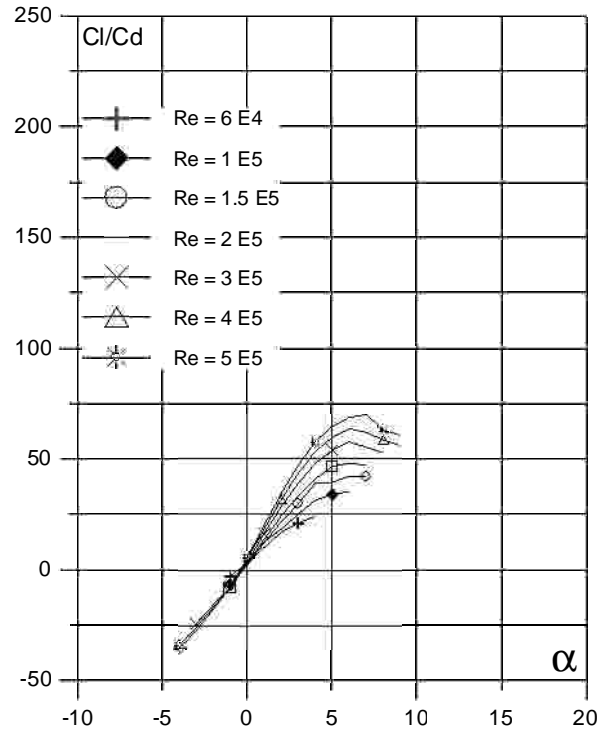
(d)

Fig. 3.4.2. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 4083. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

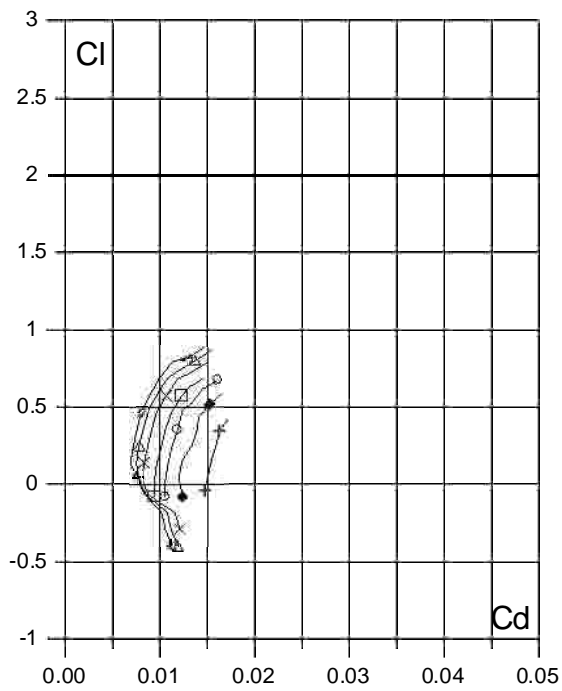
Fig. 3.4.2. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S 4083.



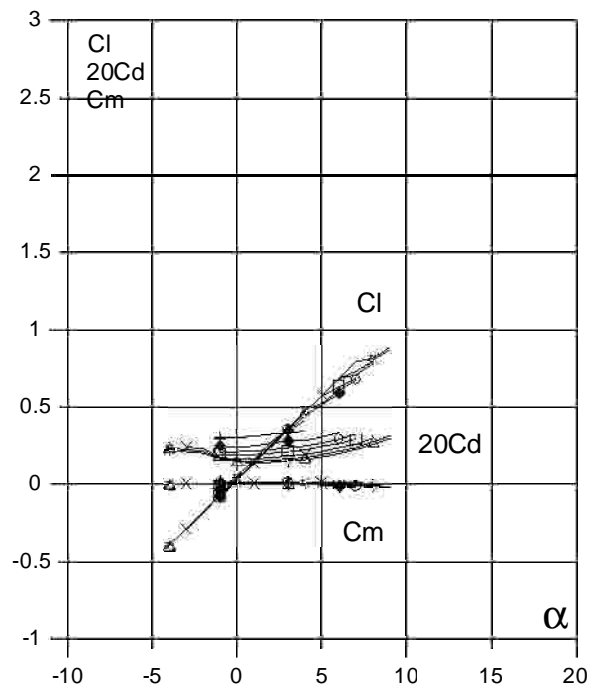
(a)



(c)



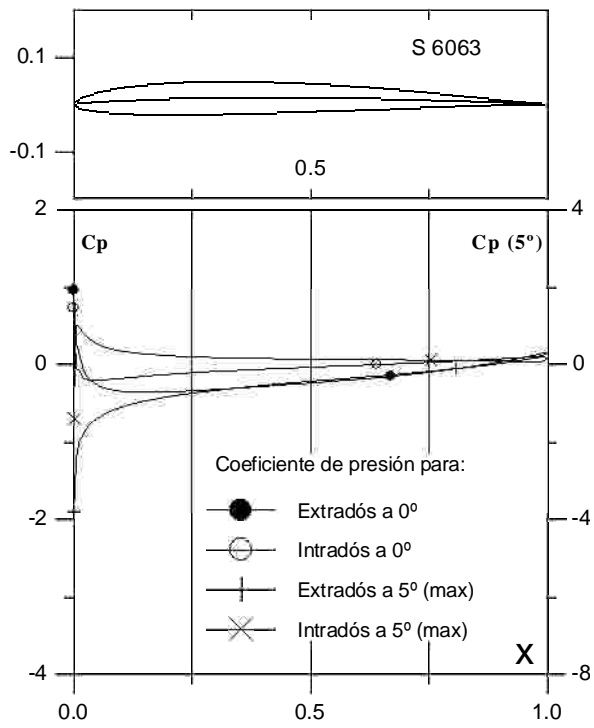
(b)



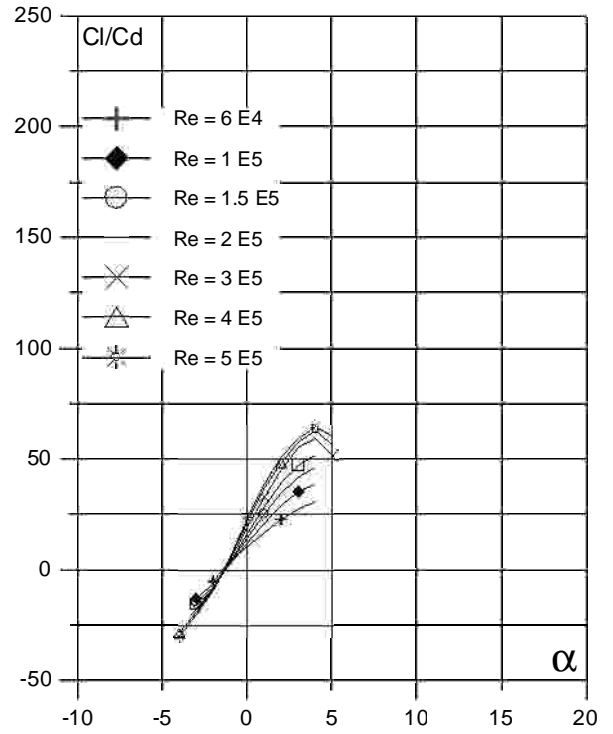
(d)

Fig. 3.4.3. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $8^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 5010. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

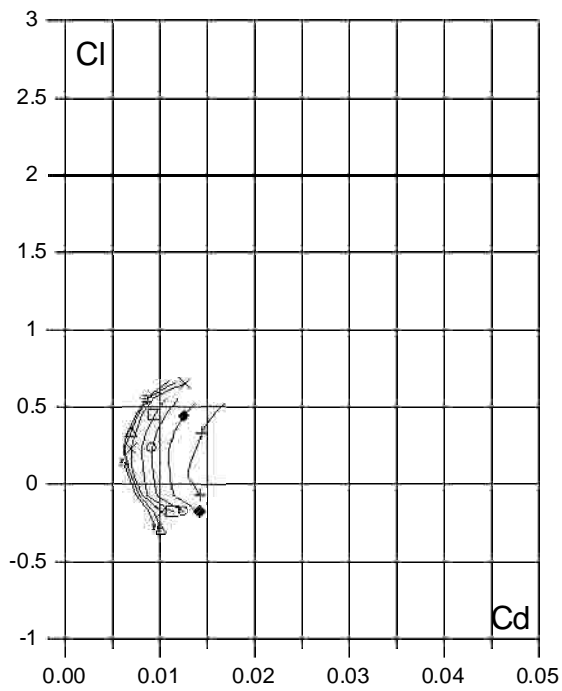
Fig. 3.4.3. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S 5010.



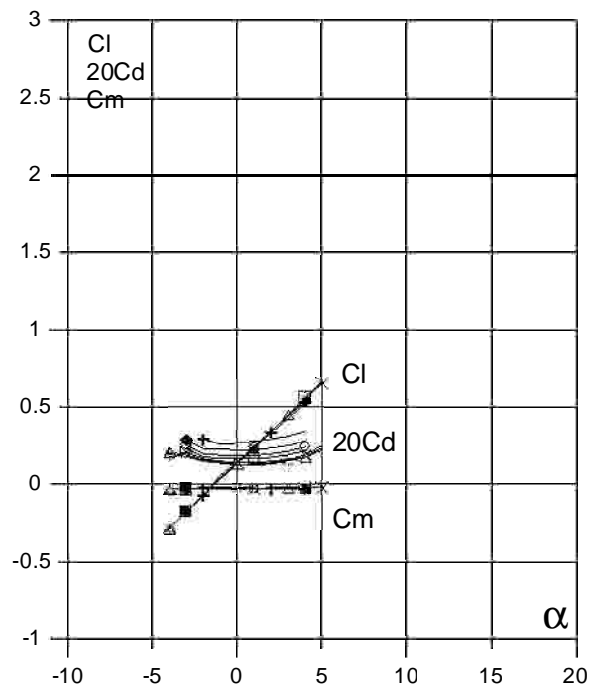
(a)



(c)



(b)

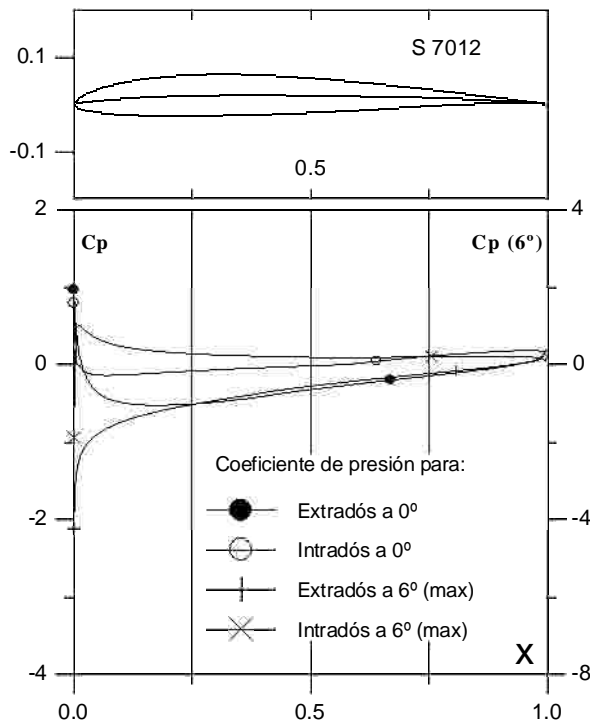


(d)

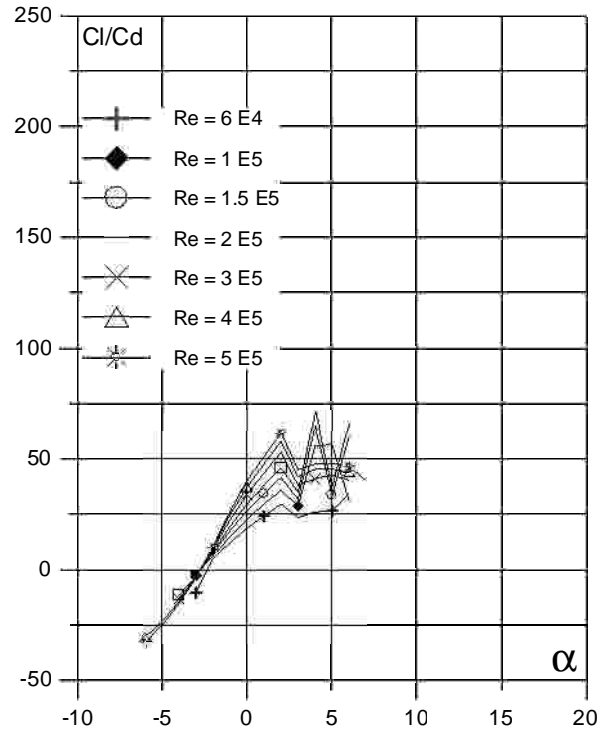
Fig. 3.4.4. (a)  $C_p$  ( $0^\circ \alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 6063. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

Fig. 3.4.4. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil S 6063.

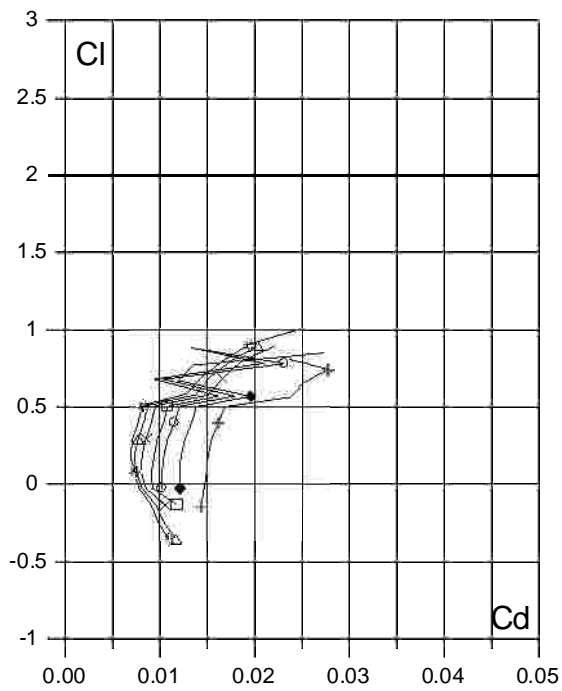




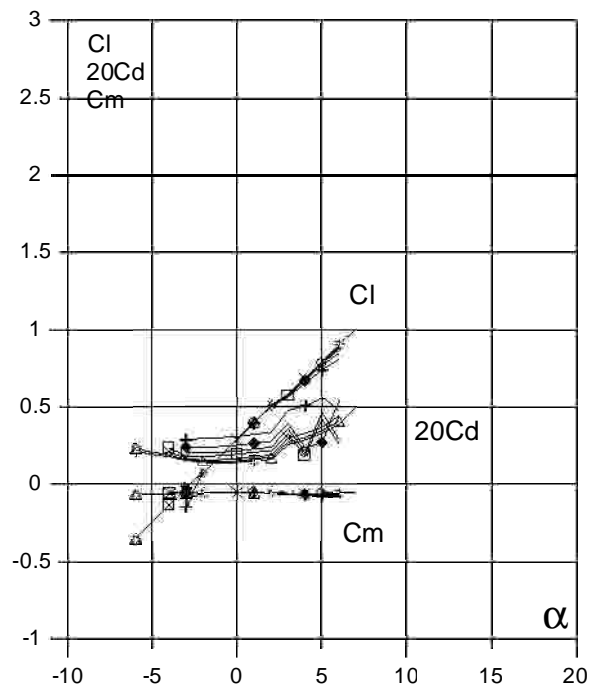
(a)



(c)



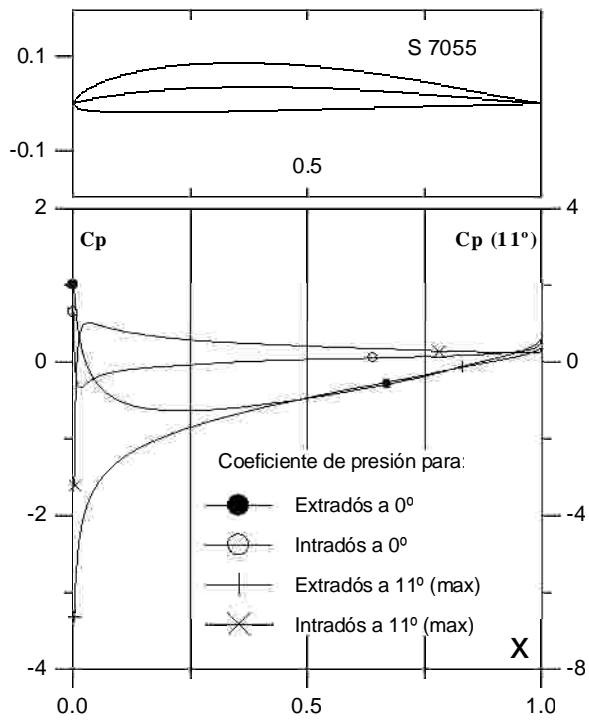
(b)



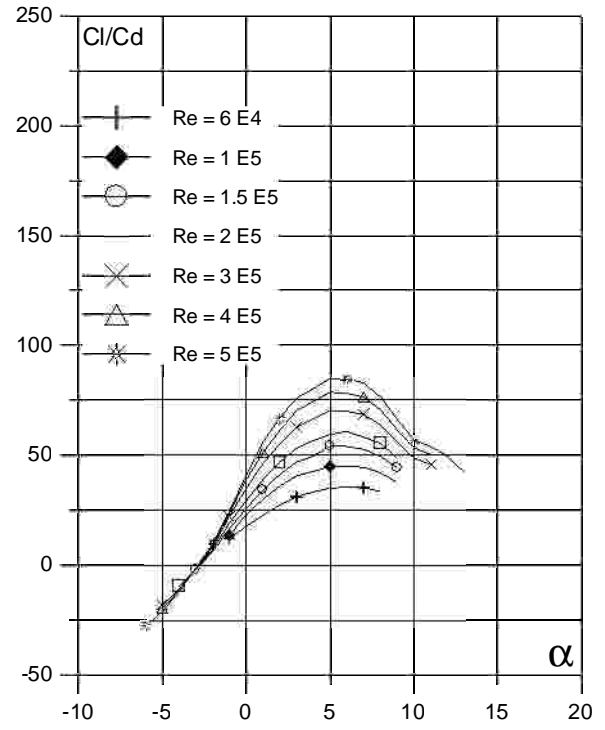
(d)

Fig. 3.4.5. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $6^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 7012. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

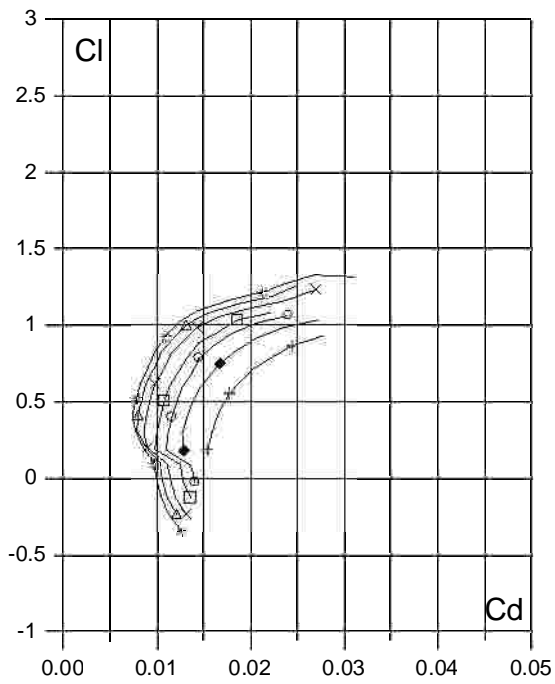
Fig. 3.4.5. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil S 7012.



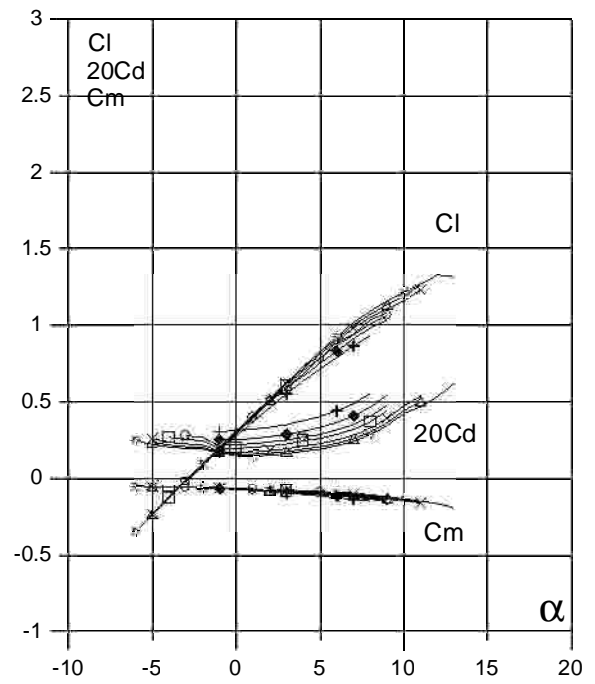
(a)



(c)



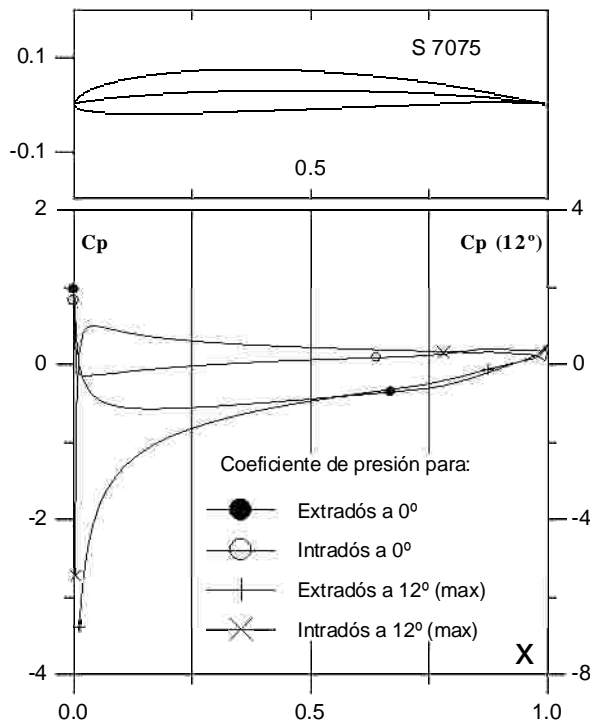
(b)



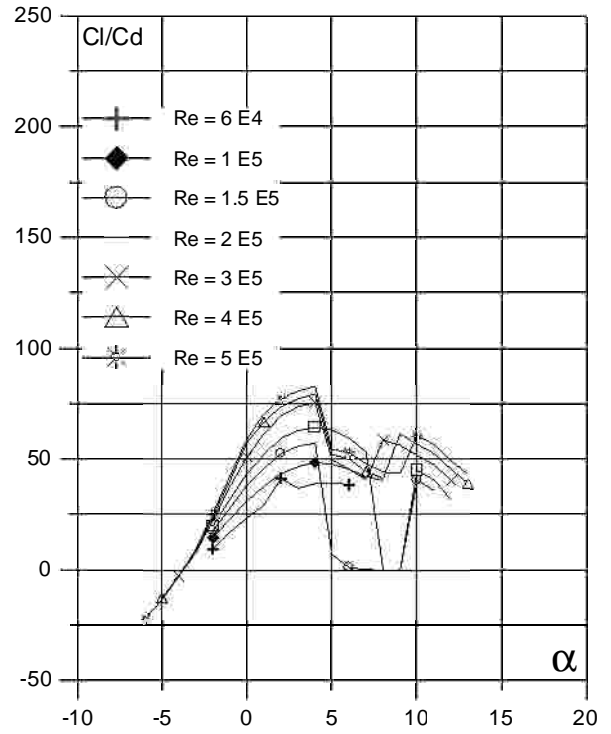
(d)

Fig. 3.4.6 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 7055. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

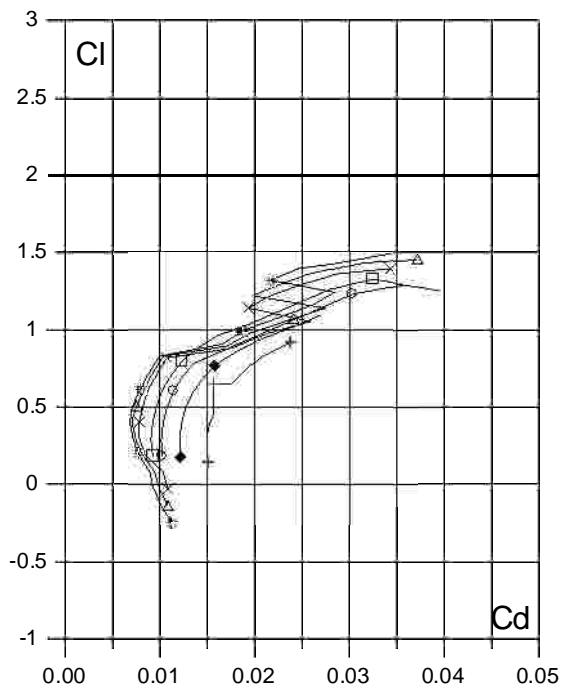
Fig. 3.4.6 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S 7055.



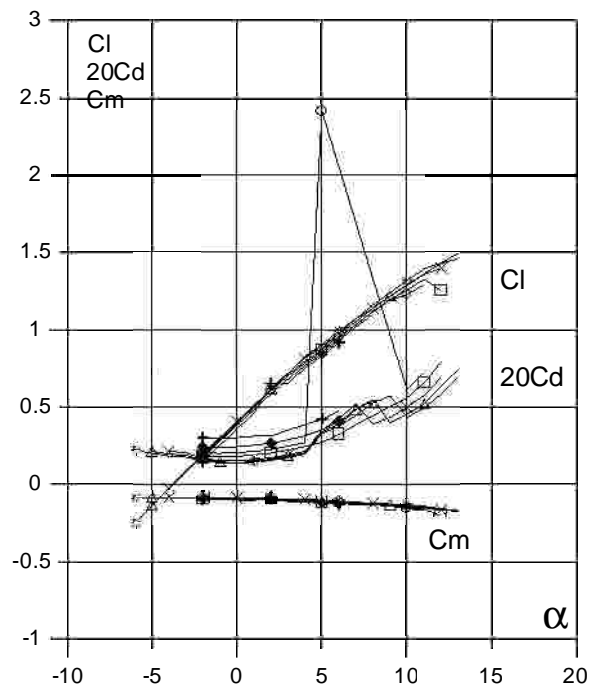
(a)



(c)



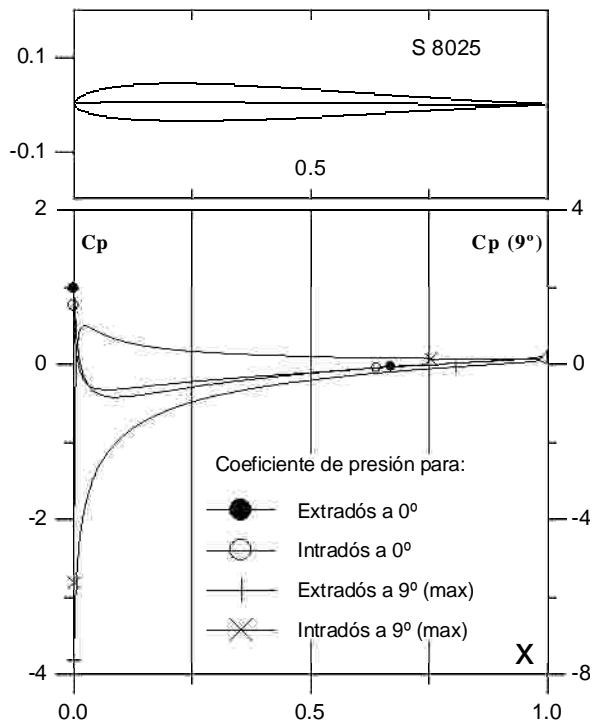
(b)



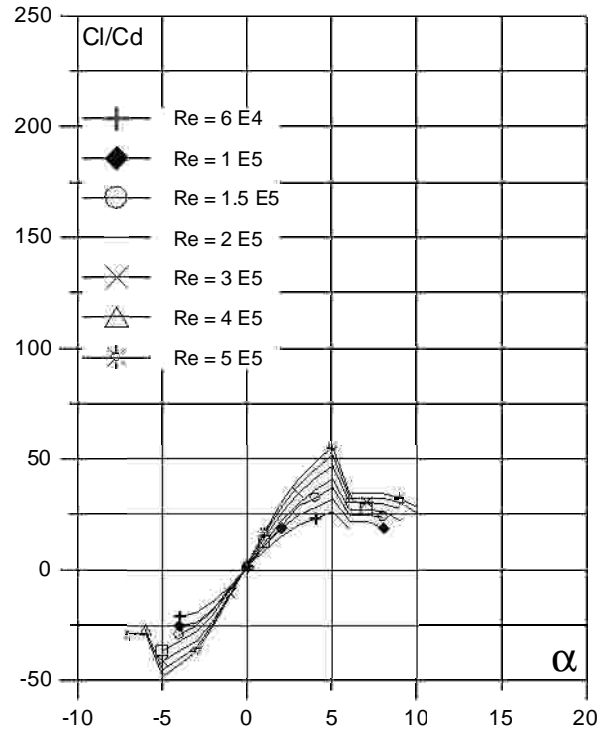
(d)

Fig. 3.4.7 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 7075. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

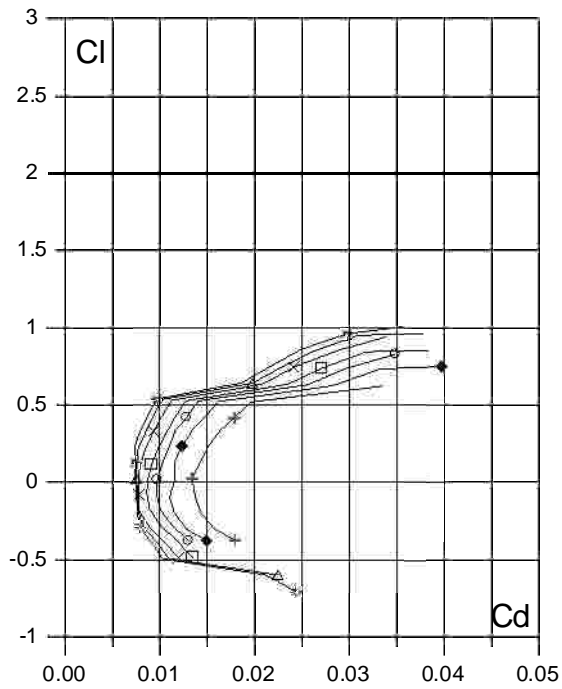
Fig. 3.4.7. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S 7075.



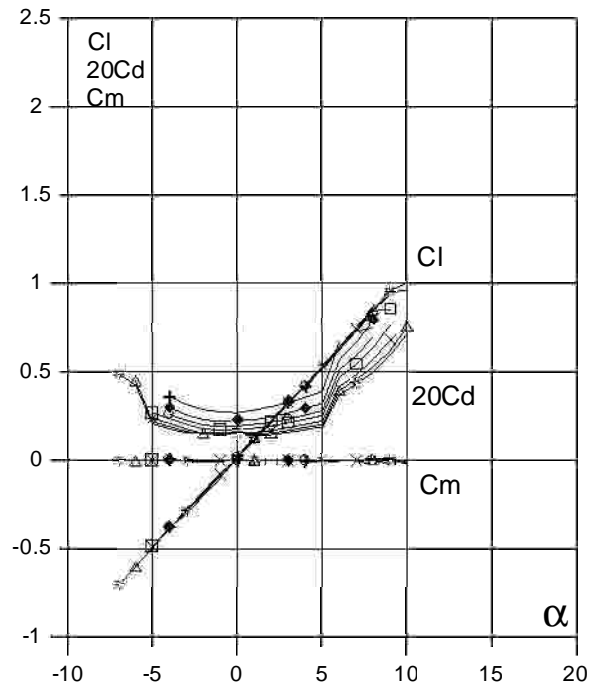
(a)



(c)



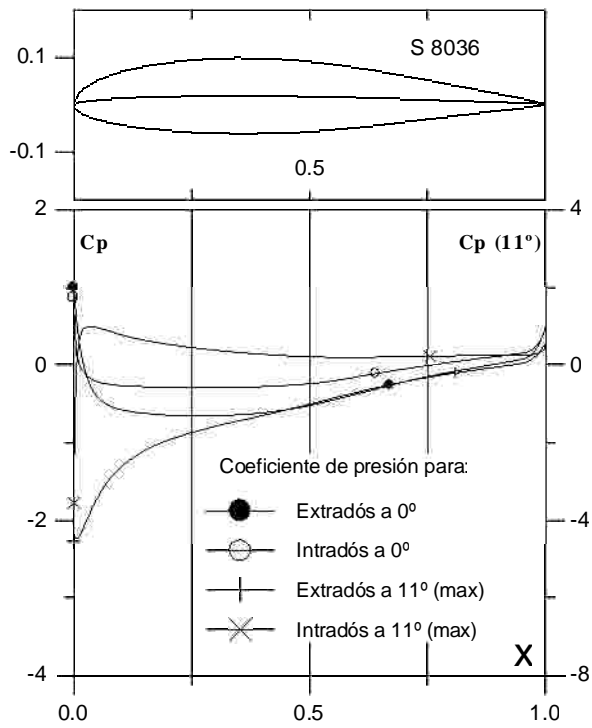
(b)



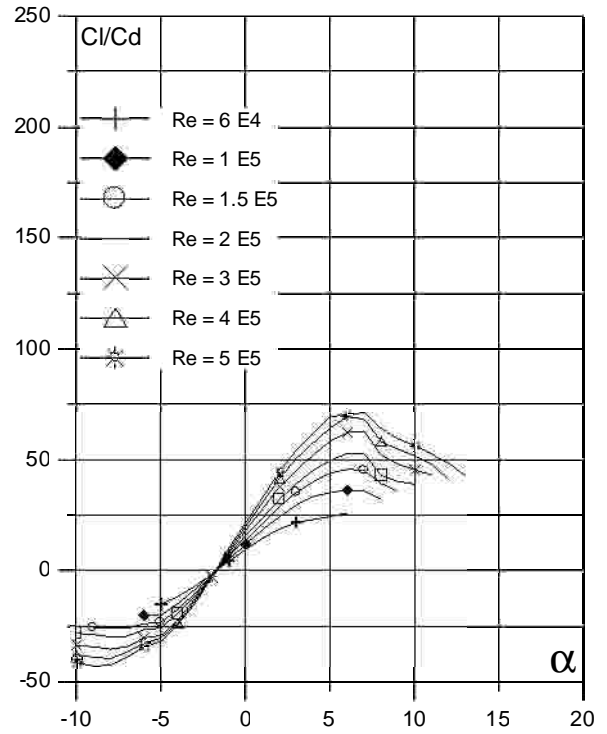
(d)

Fig. 3.4.8 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 8025. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

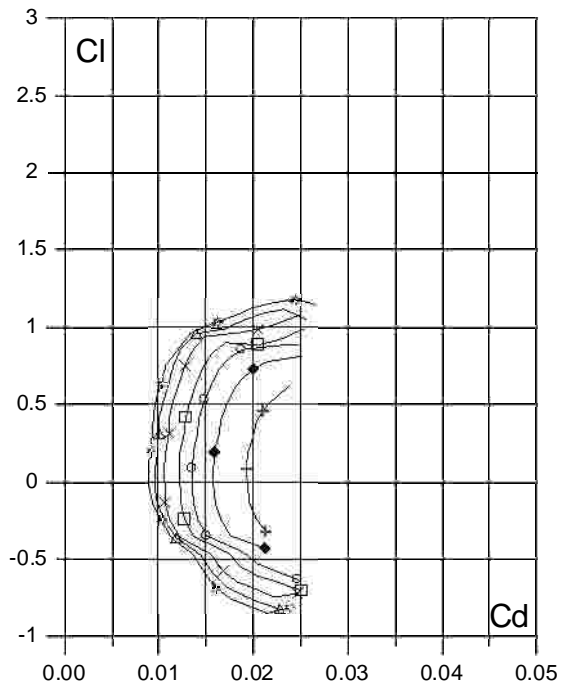
Fig. 3.4.8 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S 8025.



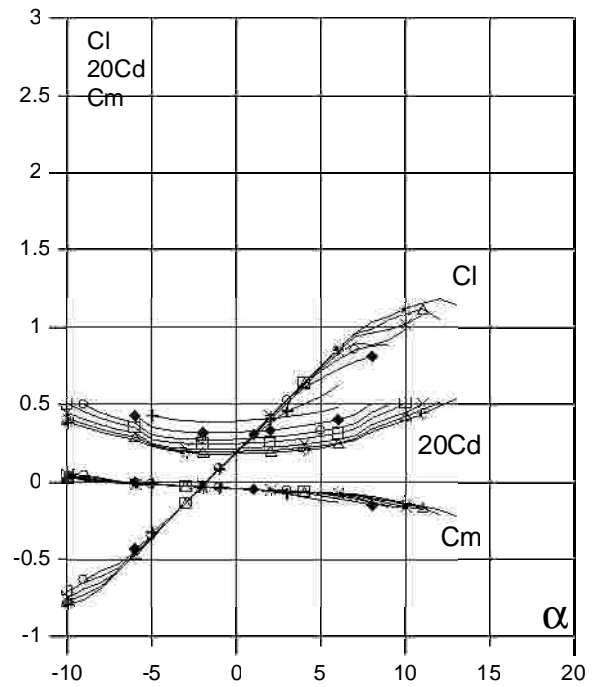
(a)



(c)



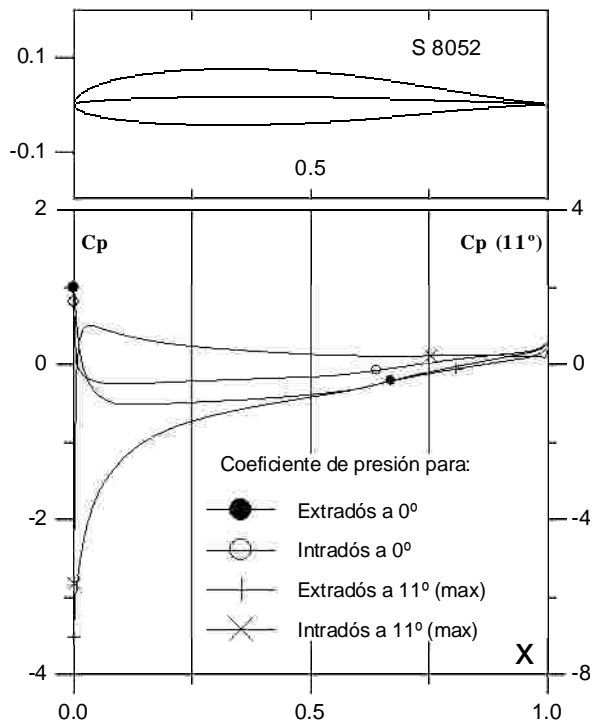
(b)



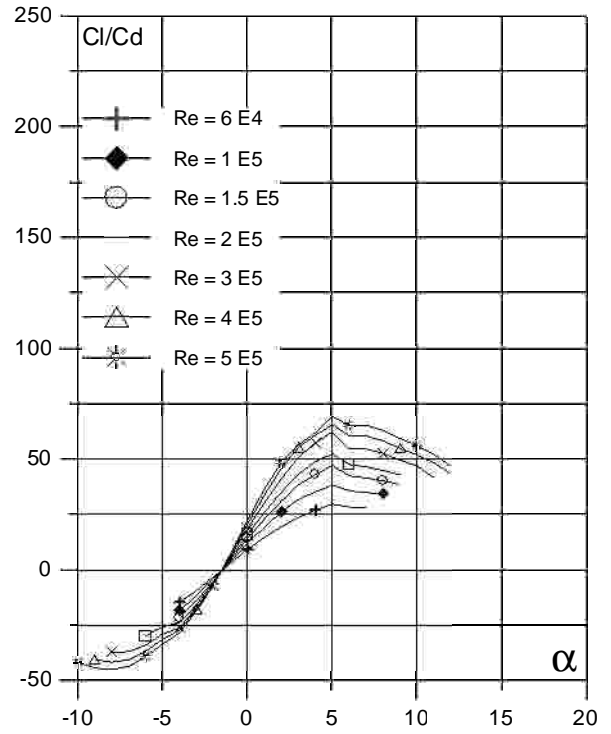
(d)

Fig. 3.4.9 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 8036. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

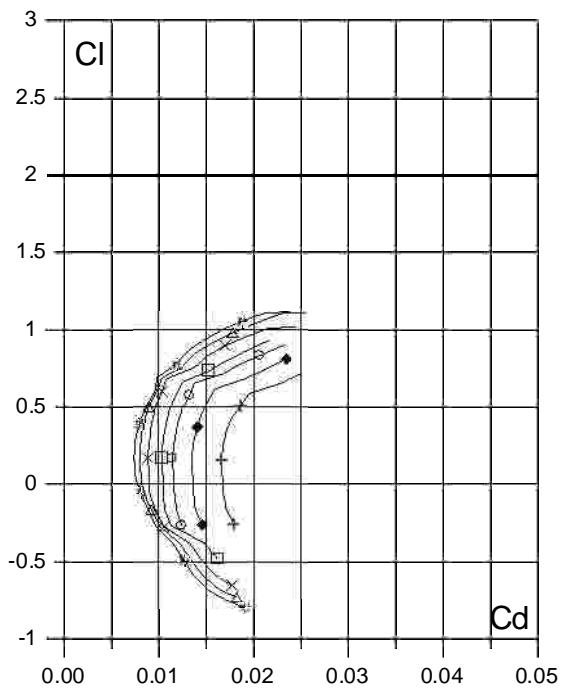
Fig. 3.4.9. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S 8036.



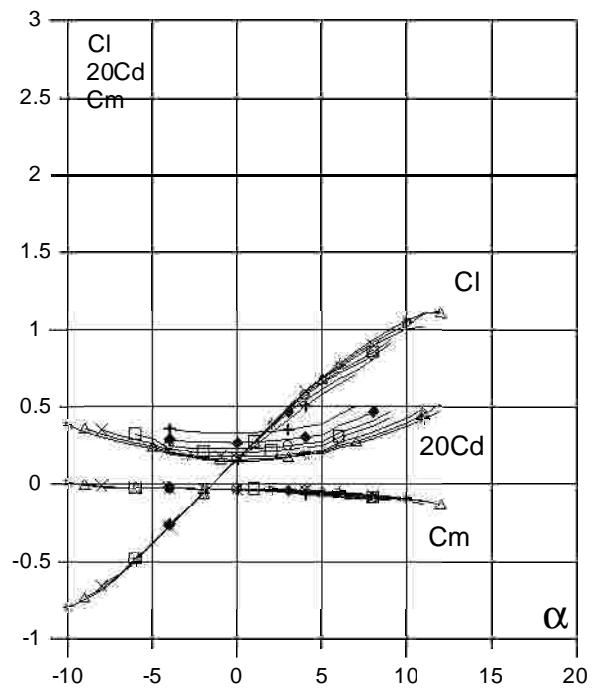
(a)



(c)



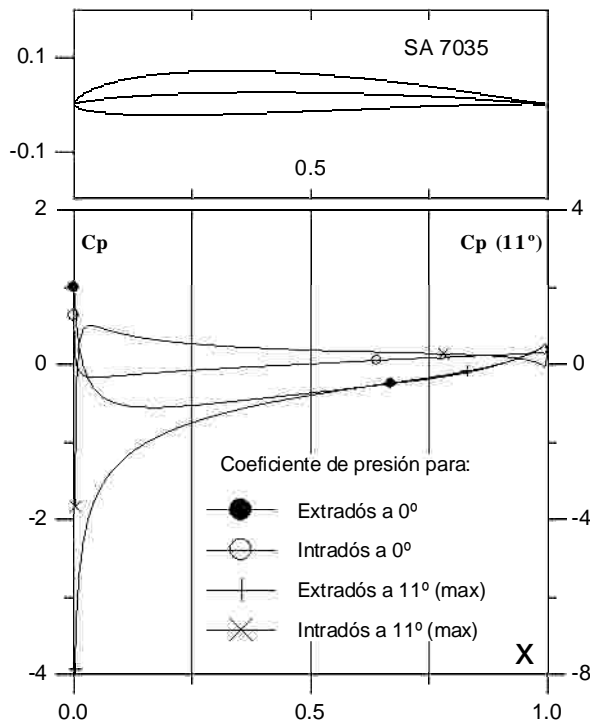
(b)



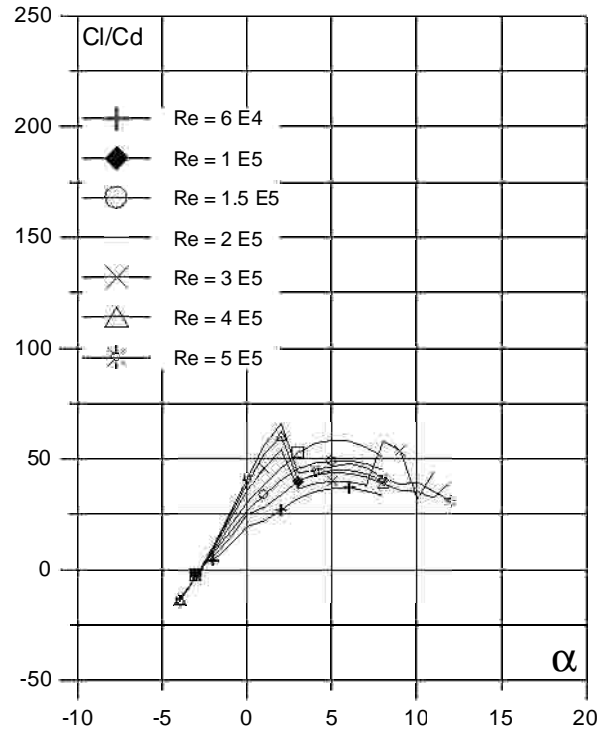
(d)

Fig. 3.4.10. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$   $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S 8052. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

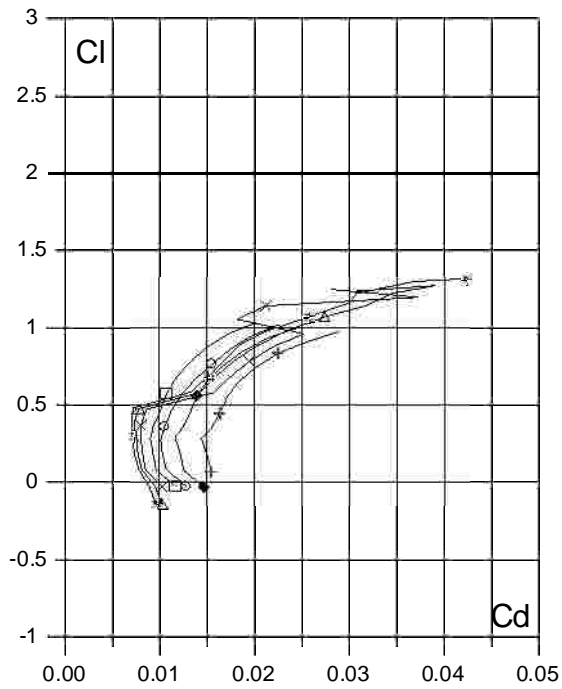
Fig. 3.4.10. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S 8052.



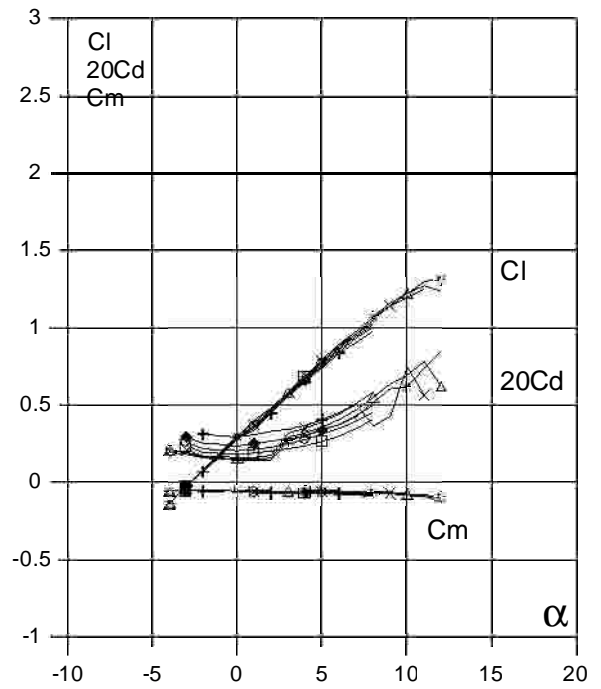
(a)



(c)



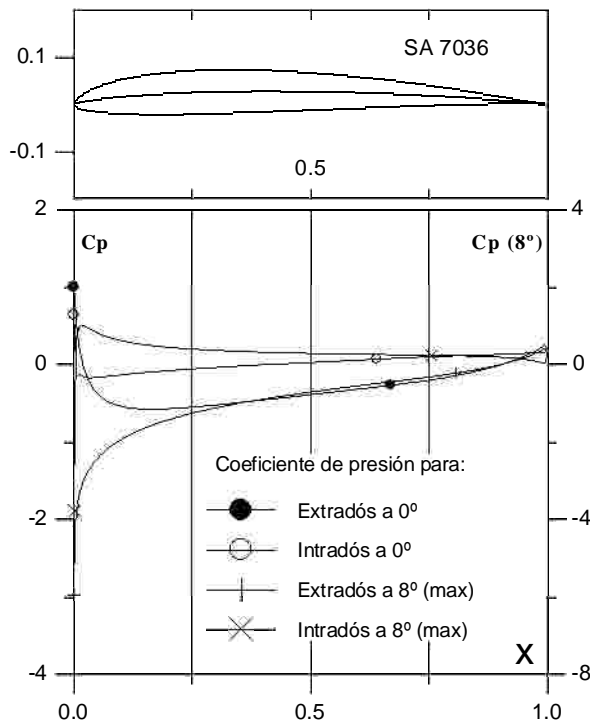
(b)



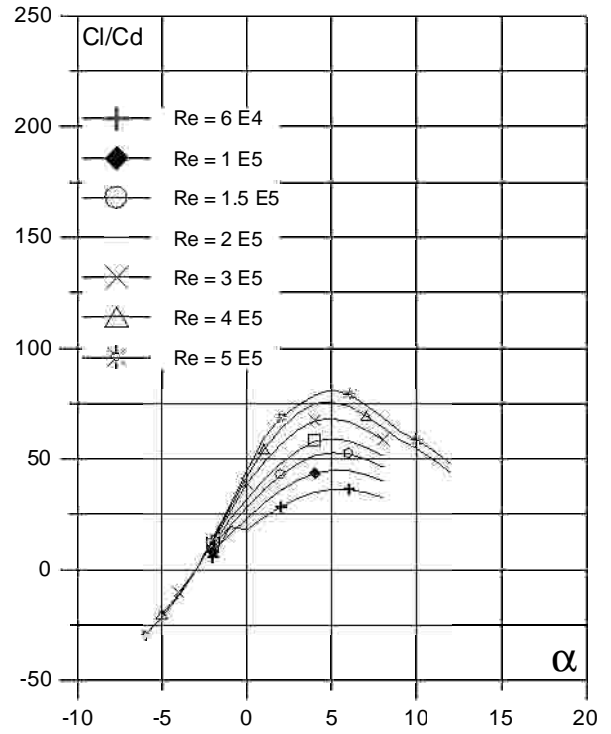
(d)

Fig. 3.4.11. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$   $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SA 7035. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

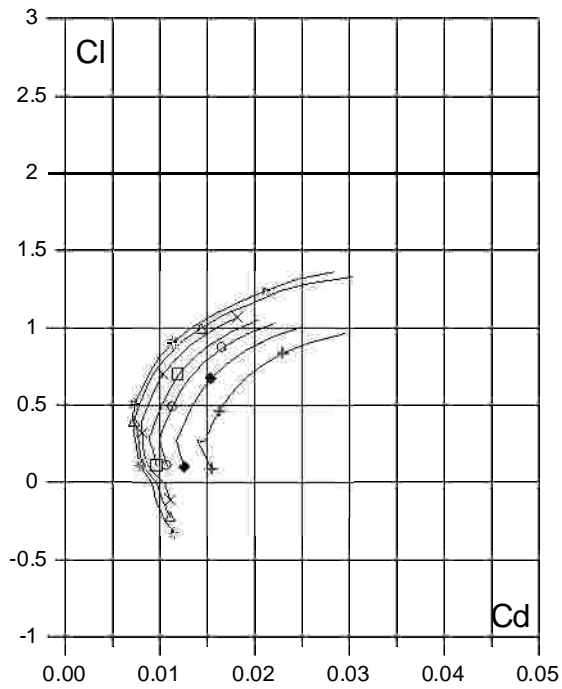
Fig. 3.4.11. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SA 7035.



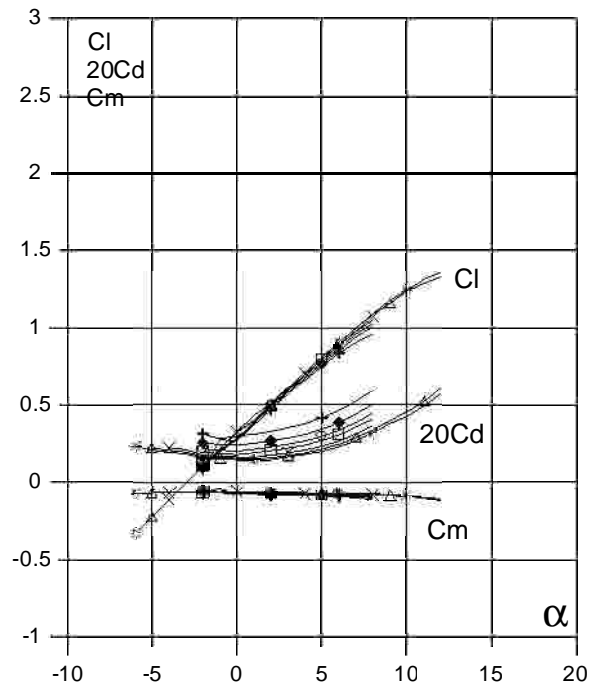
(a)



(c)



(b)

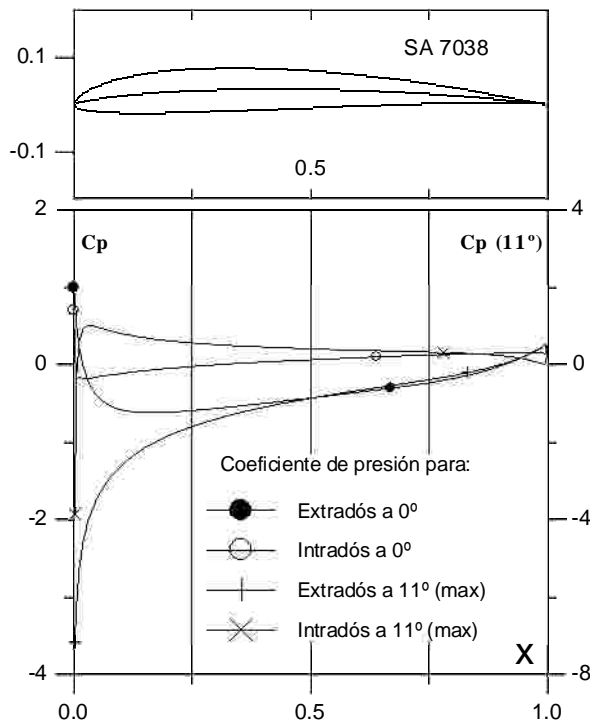


(d)

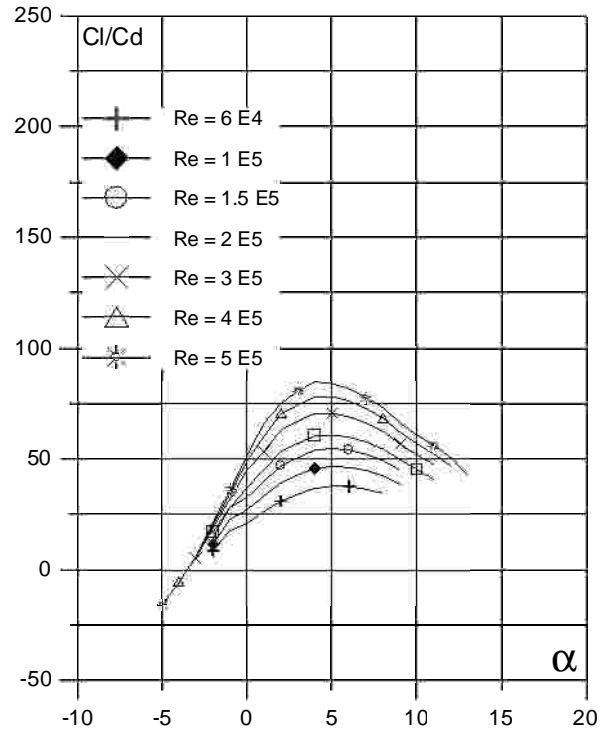
Fig. 3.4.12 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $8^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SA 7036. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

Fig. 3.4.12. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SA 7036.

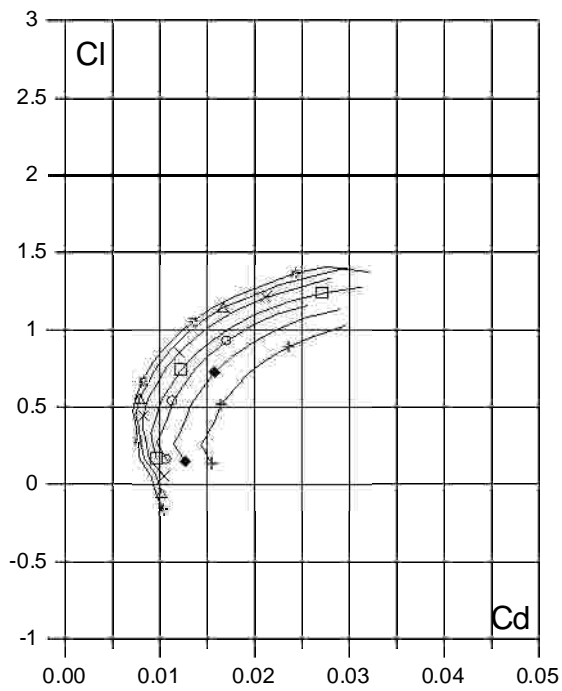




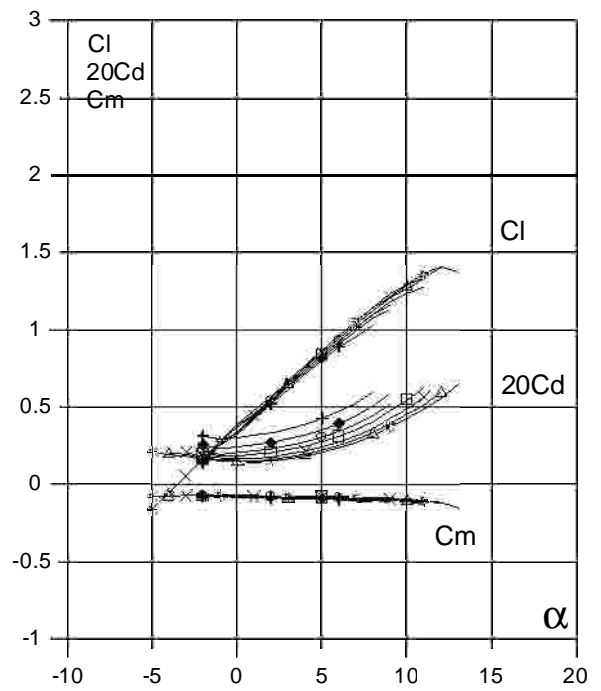
(a)



(c)



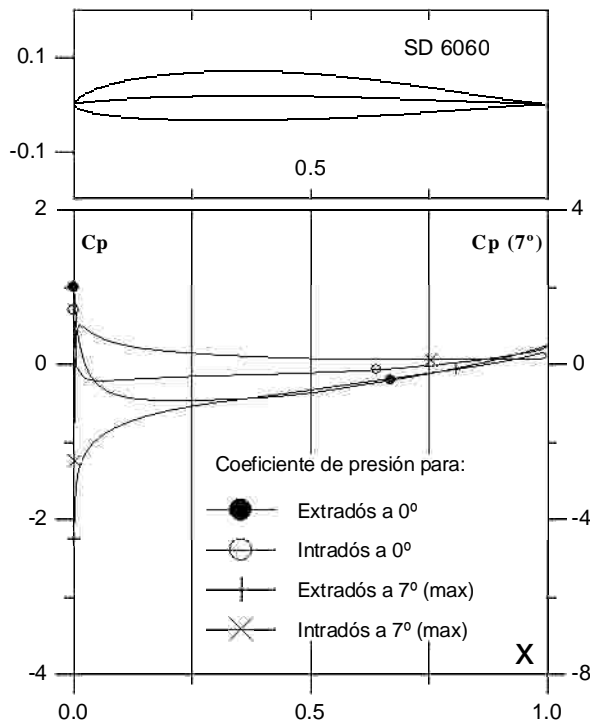
(b)



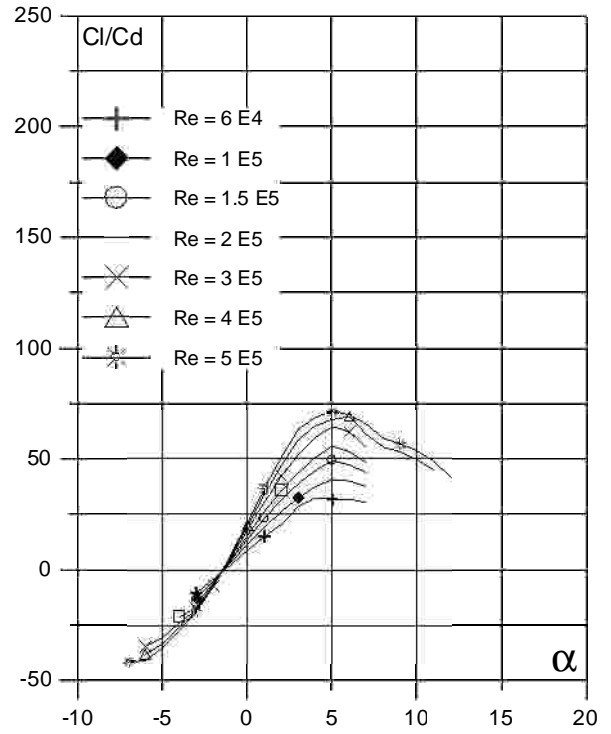
(d)

Fig. 3.4.13. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$   $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SA 7038. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

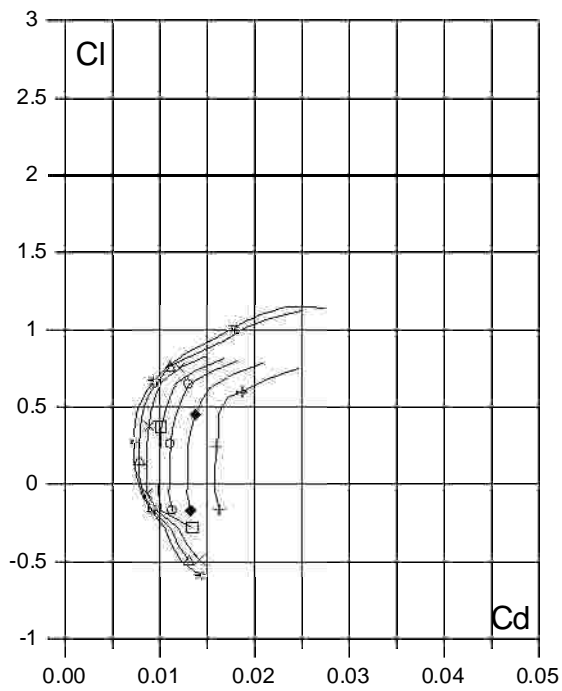
Fig. 3.4.13. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SA 7038.



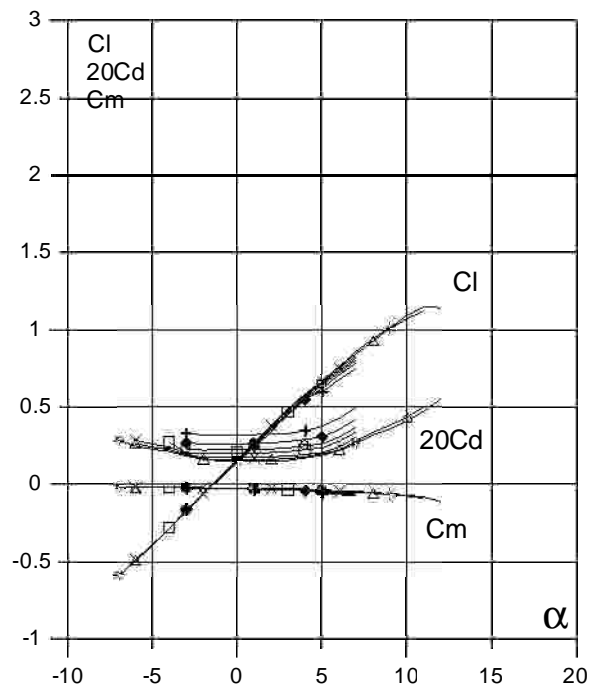
(a)



(c)



(b)



(d)

Fig. 3.4.14 (a)  $C_p (0^\circ \text{ y } 7^\circ \text{ para } C_{lmax})$  vs. X para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SD 6060. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

Fig. 3.4.14. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SD 6060.

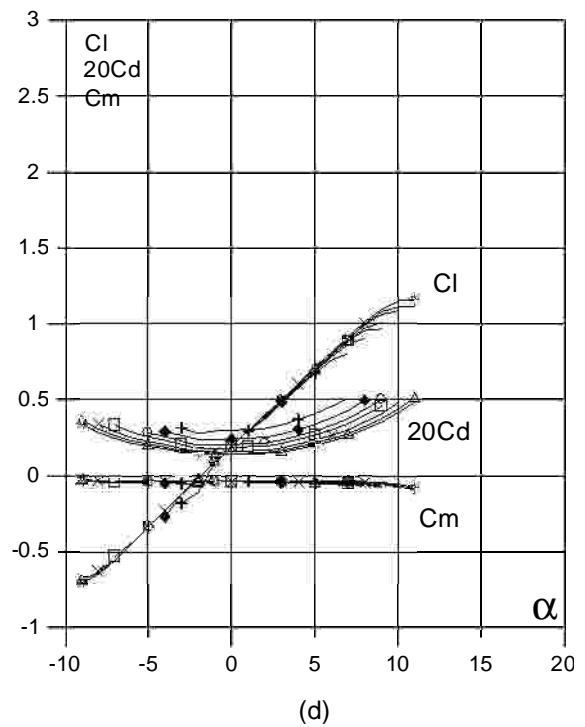
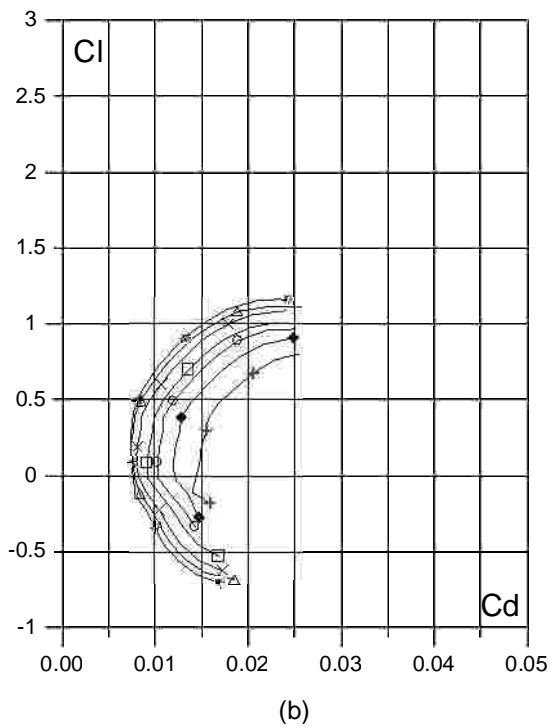
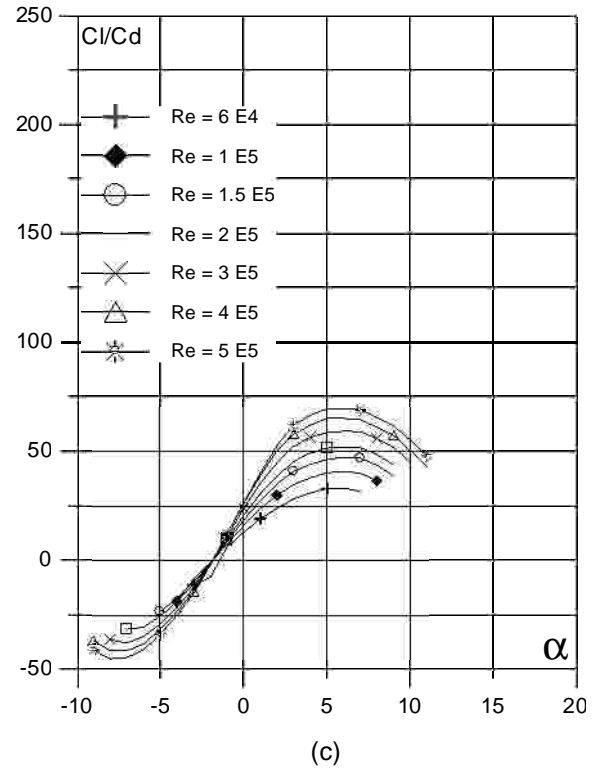
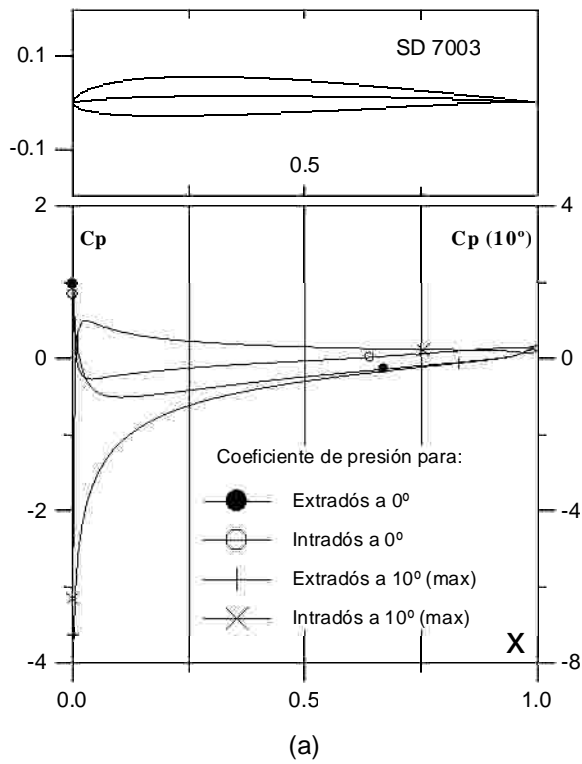
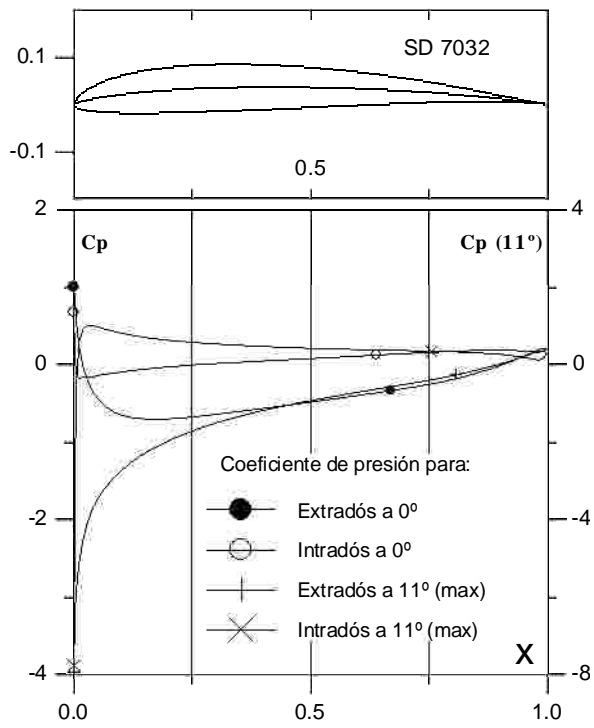
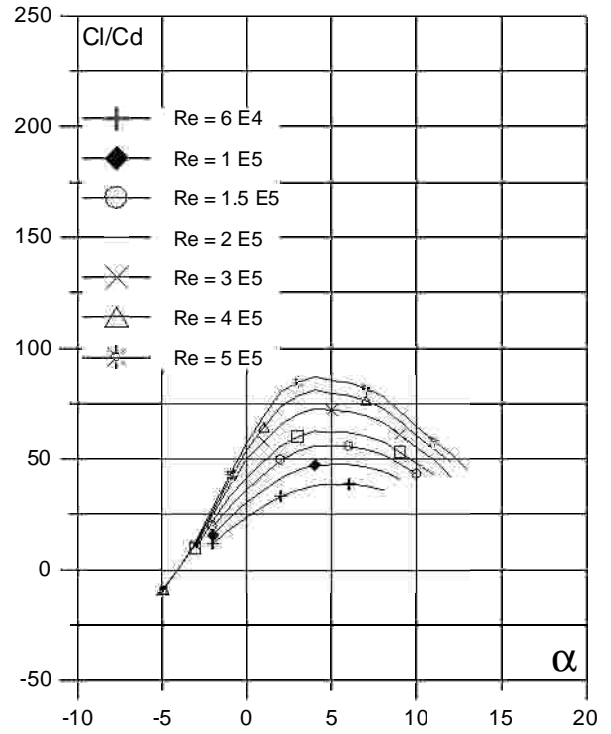


Fig. 3.4.15 (a)  $C_p (0^\circ \text{ y } \alpha \text{ para } C_{lmax})$  vs. X para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SD 7003. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

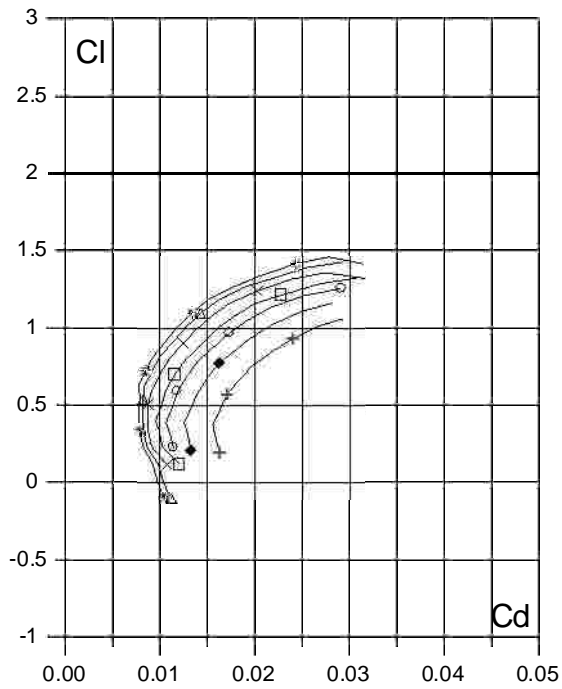
Fig. 3.4.15. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SD 7003.



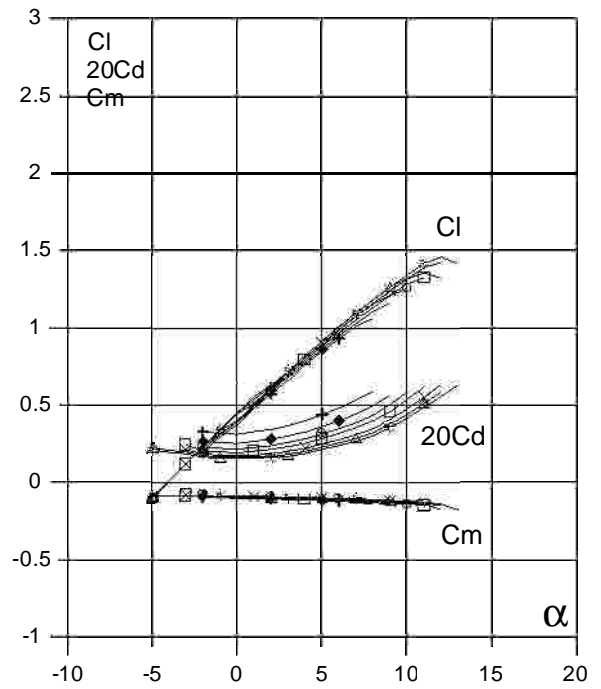
(a)



(c)



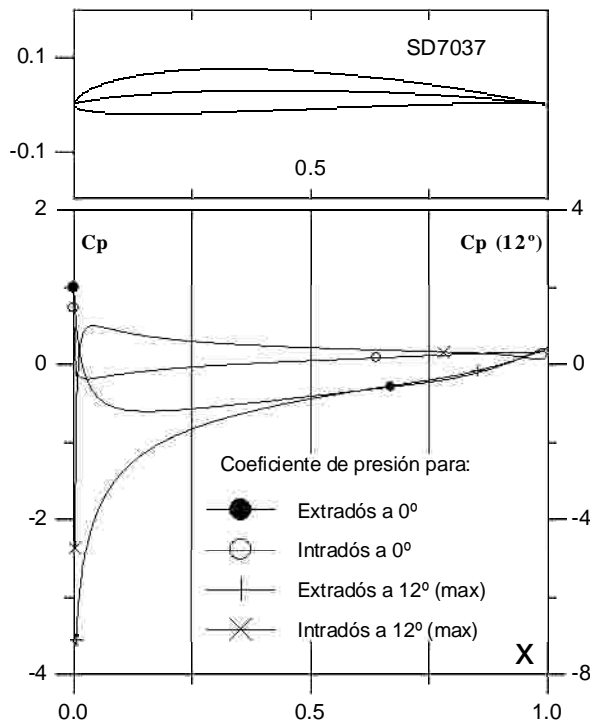
(b)



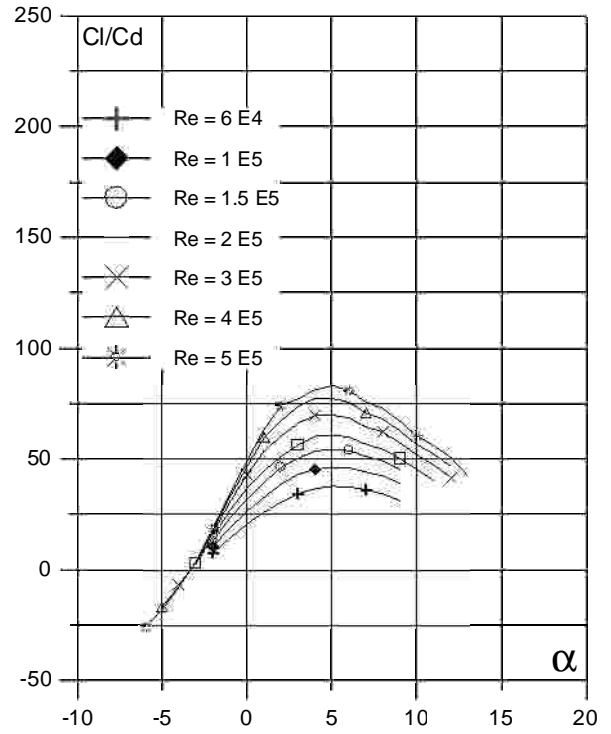
(d)

Fig. 3.4.16. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$   $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SD 7032. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

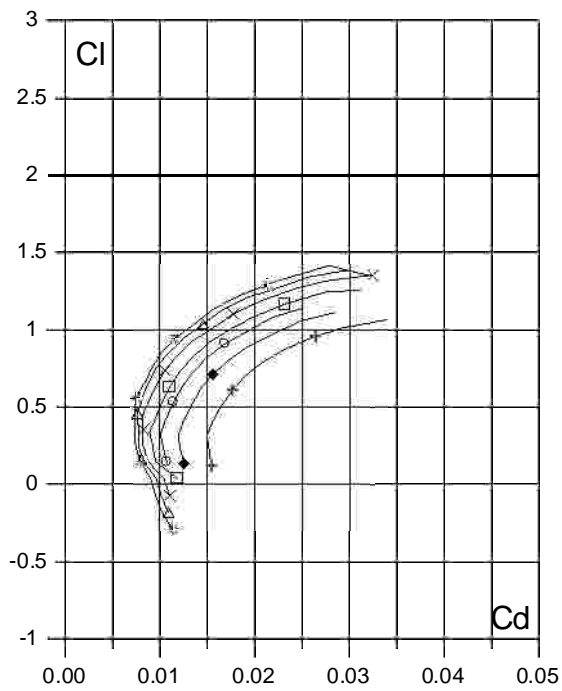
Fig. 3.4.16. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SD 7032.



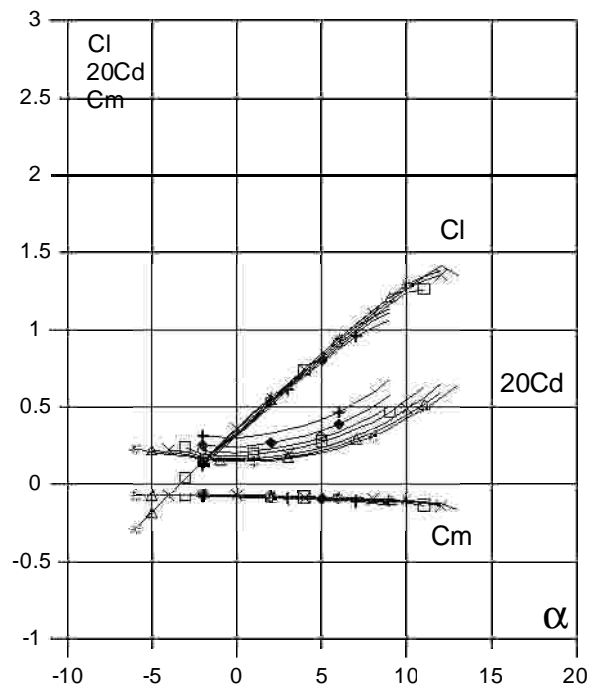
(a)



(c)



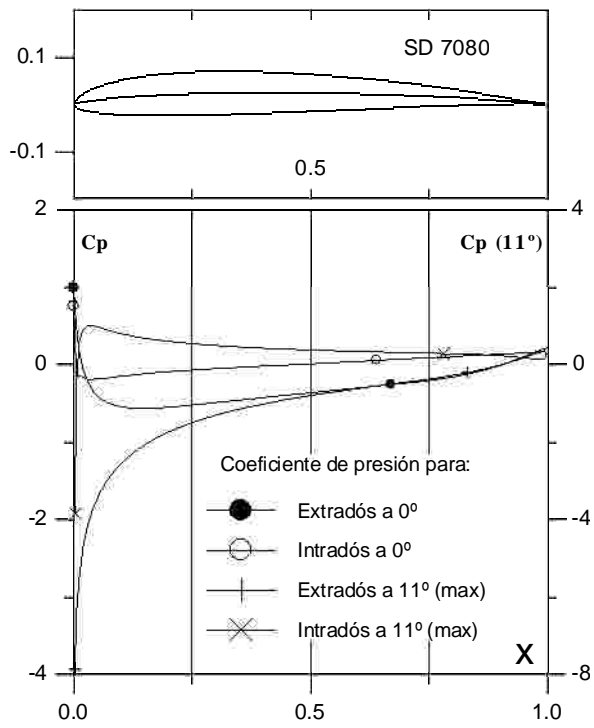
(b)



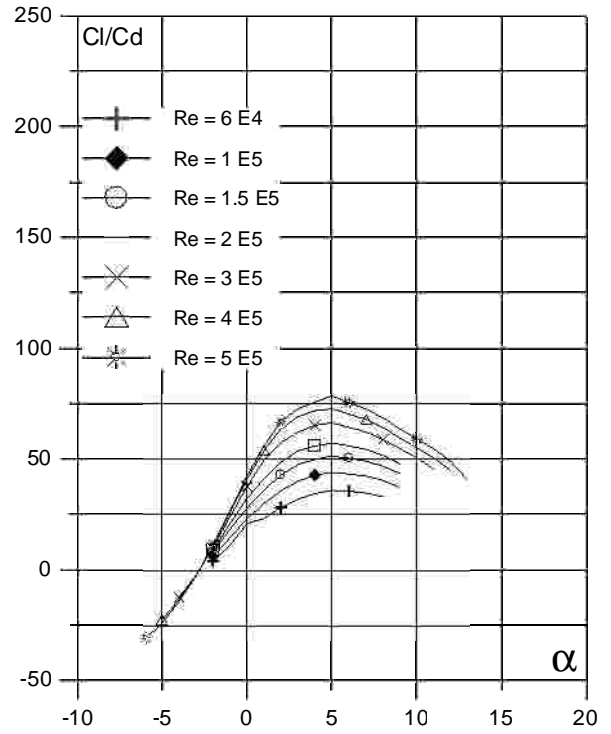
(d)

Fig. 3.4.17. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$   $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SD 7037. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

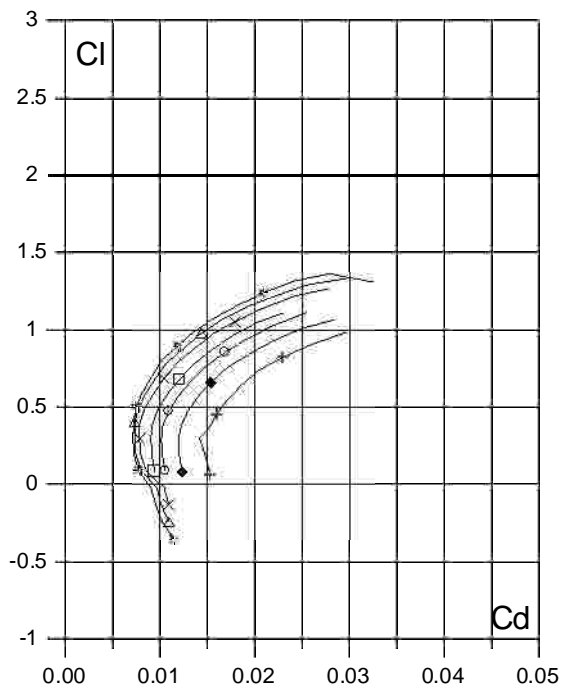
Fig. 3.4.17. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SD 7037.



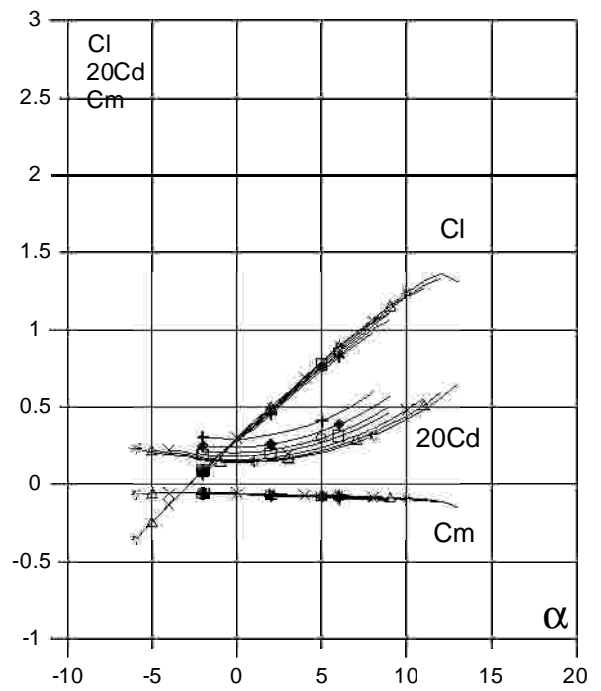
(a)



(c)



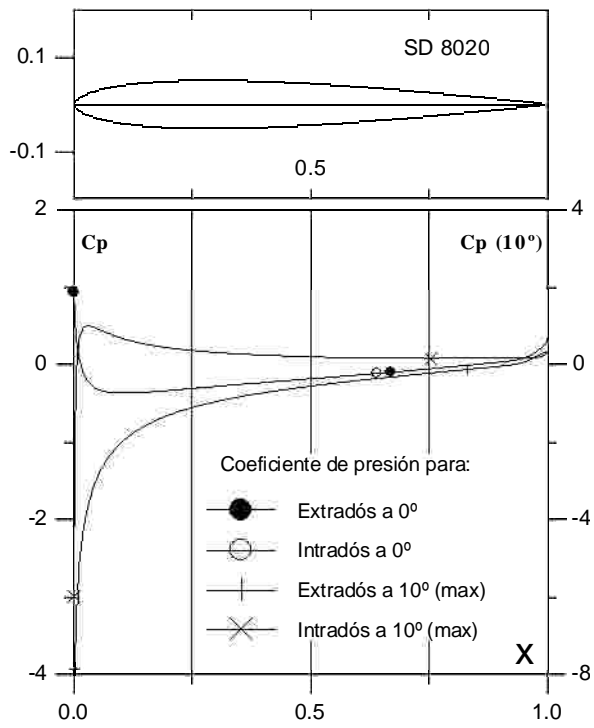
(b)



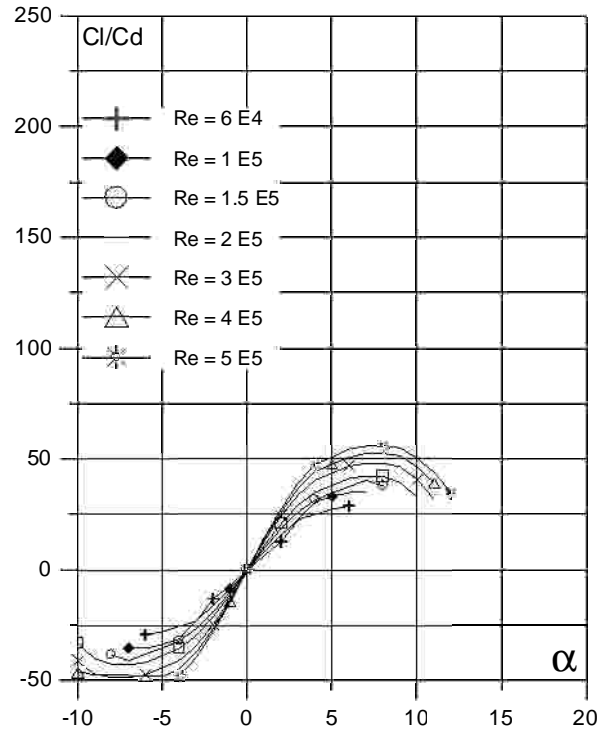
(d)

Fig. 3.4.18. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$   $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SD 7080. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

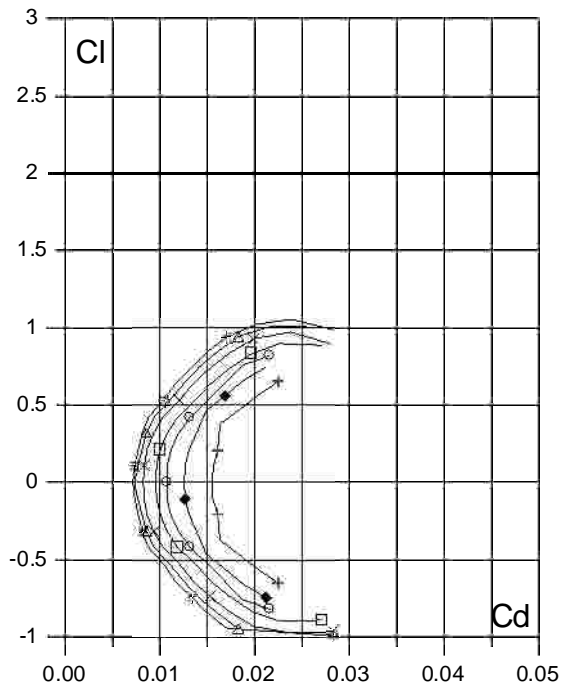
Fig. 3.4.18. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SD 7080.



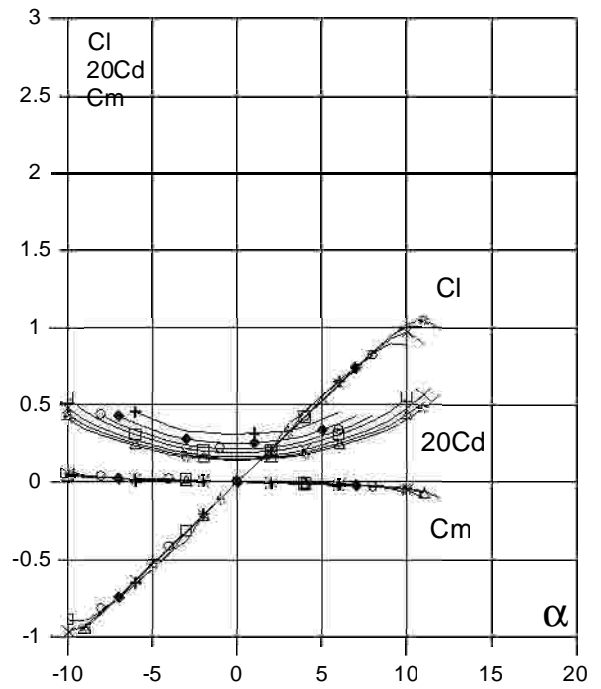
(a)



(c)



(b)



(d)

Fig. 3.4.19 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $10^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 3 E5$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SD 8020. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

Fig. 3.4.19 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SD 8020.

### 3.5 Comparación de la Evaluación Computacional y Experimental

Se presentan las tablas de comparación entre datos experimentales y los obtenidos computacionalmente tablas 3.5.1 a 3.5.19.

Para determinar la influencia del número de Reynolds en la variación de los errores relativos entre los datos experimentales y resultados computacionales se obtuvo el promedio de los errores relativos para un rango de 0 a 12 grados para cada número de Reynolds aplicado a todos los perfiles estudiados y se observó la siguiente tendencia:

Para  $C_l$ ,  $C_d$  y por ende la fineza aerodinámica a medida que se aumenta el  $Re$  en la mayoría de los casos el error relativo disminuye.

Respecto al ángulo de ataque se observa que para un rango de 0 a 9 grados la variación de los valores experimentales y computacionales en todos los perfiles para  $C_l$  es relativamente constante como se observa en la figura 3.5.1 donde se observa que las curvas de  $C_l$  experimental y computacional son paralelas.

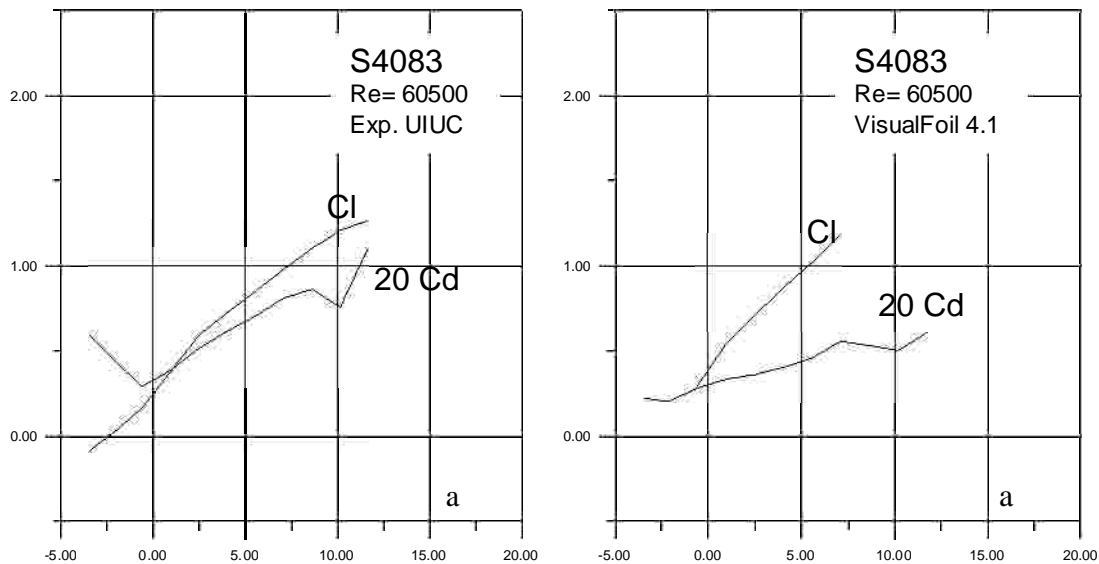


Fig. 3.5.1 Comparación de la curvas  $C_l$  vs.  $\alpha$  de VisualFoil 4.1 y experimental

Respecto a las características geométricas se realizó una comparación considerando los parámetros geométricos espesor máximo, flecha máxima y área respecto a los coeficientes de sustentación, coeficientes arrastre y fineza aerodinámica pero no se encontró ninguna tendencia significativa que permita inferir que alguno de estos parámetros pueda influir en la diferencia de los resultados computaciones y experimentales.

Los perfiles que obtuvieron las menores diferencias respecto al  $C_l$  es el perfil SA7036 y a continuación otro de su misma familia el SA7038.

Para  $C_d$  el perfil que presentó menor diferencia comparada fue SA7038

Para la fineza aerodinámica el perfil con menor diferencia fue SA7038



### 3.6 Comentarios

Como se mencionó en el capítulo 2 los resultados computacionales obtenidos en este trabajo tienen aspectos similares a los realizados por otros a el más importante es que la diferencia de los valores del coeficiente de arrastre todos los perfiles seleccionados es mucho mayor que la diferencia respecto a los coeficientes de sustentación experimental y computacional respectivamente. Esto se debe a diversos factores, como por ejemplo, la inexistencia de parámetros documentados de rugosidad medidos sobre la superficie del modelo del perfil, que puedan ser incorporados a la evaluación computacional, a fin de considerar su influencia en la determinación del coeficiente de arrastre.

La comparación de los resultados experimentales, considerados como certeros, en consecuencia servirán como referencia, y los valores obtenidos en la evaluación computacional de los perfiles SELIG, mediante el código Visual Foil 4.1, permitirá poner en evidencia la conveniencia y la utilidad obtenidas para el caso de esta clase de perfiles.

Para tal fin se calcularán los errores absolutos y relativos utilizando los valores experimentales y computacionales de los parámetros  $C_l$ ,  $C_d$  y  $e$ .

El error absoluto viene dado por la diferencia entre los valores experimentales y computacionales para un determinado ángulo de ataque y número de Reynolds

$$\Delta C = C_e - C_c$$

Donde  $C_e$  representa el valor experimental y  $C_c$  el valor computacional. También se puede considerar la diferencia

$$\Delta C' = C_e - C_c$$

El error relativo,  $E_r$  se obtiene dividiendo el error absoluto entre el valor considerado de referencia.

Se puede definir, convencionalmente dos expresiones para el error relativo:

$$E_{r1} = \Delta C / C_e = 1 - (C_c/C_e) \quad \text{o} \quad E'_{r1} = \Delta C / C_c = (C_e/C_c) - 1$$

$$E_{r2} = \Delta C' / C_e = 1 - (C_c/C_e) \quad \text{o} \quad E'_{r2} = \Delta C' / C_e = (C_c/C_e) - 1$$

Lo que importa es la interpretación de los resultados.

En el caso de  $Er_1$  si  $C_c < C_e$  resulta que  $Er_1 > 0$  significa que la evaluación computacional es más conservadora que la experimental. Si  $C_c > C_e$  resulta que  $Er_1 < 0$  lo que se interpretaría es que los valores computacionales aproximan por exceso los datos experimentales.

Una interpretación similar, pero con los valores de  $E'r_1$  invertidos respecto a  $Er_1$  coinciden con el sentido común, por diferencia del caso  $Er_1$ , donde aparecen contrarios al sentido común. De una manera similar se interpretan los resultados para  $Er_2$  y  $E'r_2$ .

Convencionalmente, en las tablas 3.5.1 a 3.5.18 se reportan los valores experimentales, computacionales obtenidos con el código Visual Foil 4.1 y los errores  $Er_1$  y  $Er_2$ .

Si  $a = 10^\circ$  y  $Re = 100.000$ , para  $Er_1$  y  $Er_2$  se obtuvieron los siguientes valores:

$$Er_1(Cl) \in (-25.26, 14.87) ; Er_1(Cd) \in (-40.94, 10.59) ; Er_1(e) \in (-6.57, 17.97)$$

$$Er_2(Cl) \in (-17.46, 9.13) ; Er_2(Cd) \in (-11.85, 29.05) ; Er_2(e) \in (-40.62, 6.16)$$

De esta manera se ha cuantificado la aproximación por o que los valores computacionales considerados representan respecto a los datos experimentales.

## 4. CAPITULO 4. EVALUACION COMPUTACIONAL DE PERFILES DE LA SERIE SELIG, SZ2400 Y MODIFICADOS

### 4.1. Modificación del Borde de Ataque

El método ZAREA consiste en modificar la geometría de  $\Gamma$  en la parte más cercana al borde de ataque para mejorar sus prestaciones aerodinámicas.

Esta modificación tiene lugar en el 10% de la cuerda del perfil conservando la cuerda y el espesor máximo del mismo, por medio de aproximaciones sucesivas que dan origen a nuevas curvas que unidas conforman la punta del perfil.

Este método puede aplicarse a cualquier perfil, no obstante dado las características del mismo, los mejores resultados podrán esperarse en perfiles donde la abscisa  $x$  del centro de área este ubicado lo más cercano al borde de ataque.

Este método de rediseño de los perfiles permite escoger la densidad de puntos que definen el contorno del borde de ataque modificado. La precisión de cada punto puede ser del orden de  $10^{-6}$ , para nuestro estudio los perfiles generados tienen como máximo 340 puntos (máximo número de puntos que evalúa Visual Foil 4.1), sin embargo este método permite generar la cantidad de puntos que sean necesarios según las restricciones del programa que los evalúa.

Dado que nuestro tema de interés es evaluar computacionalmente la modificación del borde de ataque la distancia entre los puntos en la cercanías del borde de ataque es de hasta 10 veces menos que la distancia entre los puntos del contorno después del 20% de la cuerda del perfil.

Aprovechando el desarrollo del CFD y el incremento de la capacidad de cálculo computacional, cada día será más importante definir el contorno del perfil con mayor detalle, este método permite crear contornos definidos por puntos distanciados con una precisión de hasta  $10^{-6}$ .

El formato de las coordenadas del perfil modificado es el estándar de la base de datos de UIUC, ampliamente divulgado y conocido, garantizando así su compatibilidad con la mayoría de programas CFD disponibles en el mercado.

Para analizar el desempeño de este método se aplicó en 20 perfiles de la serie Selig y 30 perfiles de la serie ZAREA 2400, cuyos resultados e interpretación se discuten a continuación.

## 4.2 Evaluación Computacional de los Perfiles Selig seleccionados

Para establecer la comparación entre los perfiles serie Selig modificados por el método Zarea se eligió 20 perfiles: S1020, S1046, S2046, S2050, S2060, S2062, S2091, S30 S3010, S3014, S3025, S4022, S4061, S4062, S8037, S4083, S7012, S7055 y S8038. Para los cuales se calcularon las características geométricas principales: fecha máxima, ordenada de flecha máxima, espesor máximo, ordenada de espesor máximo y su área. La fig 4.2.1 presenta el contorno de los perfiles antes mencionados.

A continuación se lista la tabla de las características geométricas de los perfiles Sel seleccionados, tabla 4.2.1.

Las figuras 4.2.2 a 4.2.21 contienen las curvas características de la evaluación computacional de los perfiles antes mencionados por medio del código Visual Foil 4.1, que a diferencia del utilizado en el capítulo 3, los números de Reynolds considerados son:  $2 \times 10^5$ ,  $5 \times 10^5$ ,  $1 \times 10^6$ ,  $2 \times 10^6$ ,  $3 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^6$  y  $9 \times 10^6$  respectivamente.

Tabla 4.2.1 Características Geométricas de la serie SELIG seleccionados

Perfil	E.max (%c)	x- E.max	Fmax(%c)	x-Fmax	Area c.u.
S1020	15,08	0.3180	5.04	0.5210	0.0987
S4083	9.22	0,2320	3.05	0,3756	0.0491
S7012	8.75	0,2871	2.02	0,3756	0.0551
S7055	10.50	0,3159	3.55	0,3756	0.0702
S2046	9.14	0.2690	2.58	0.5690	0.0567
S2050	9.00	0.2770	1.25	0.3980	0.0585
S2060	8.07	0.2740	1.81	0.4610	0.0534
S2062	8.05	0.2760	1.73	0.4600	0.0536
S2091	10.24	0.2620	3.91	0.4030	0.0638
S3002	10.04	0.2780	2.99	0.3910	0.0649
S3010	10.45	0.2600	2.82	0.3730	0.0646
S3014	9.53	0.2760	2.56	0.3920	0.0625
S3025	9.40	0.2800	2.59	0.4020	0.0619
S4022	11.26	0.3150	4.34	0.5610	0.0730
S4061	9.71	0.2730	3.90	0.4320	0.0617
S4062	9.60	0.2840	4.13	0.4720	0.0636
S8025	8.07	0.2370	0.47	0.1750	0.0483
S8037	15.95	0.3260	2.62	0.3470	0.1072
S8038	13.03	0.2990	0.89	0.3070	0.0866

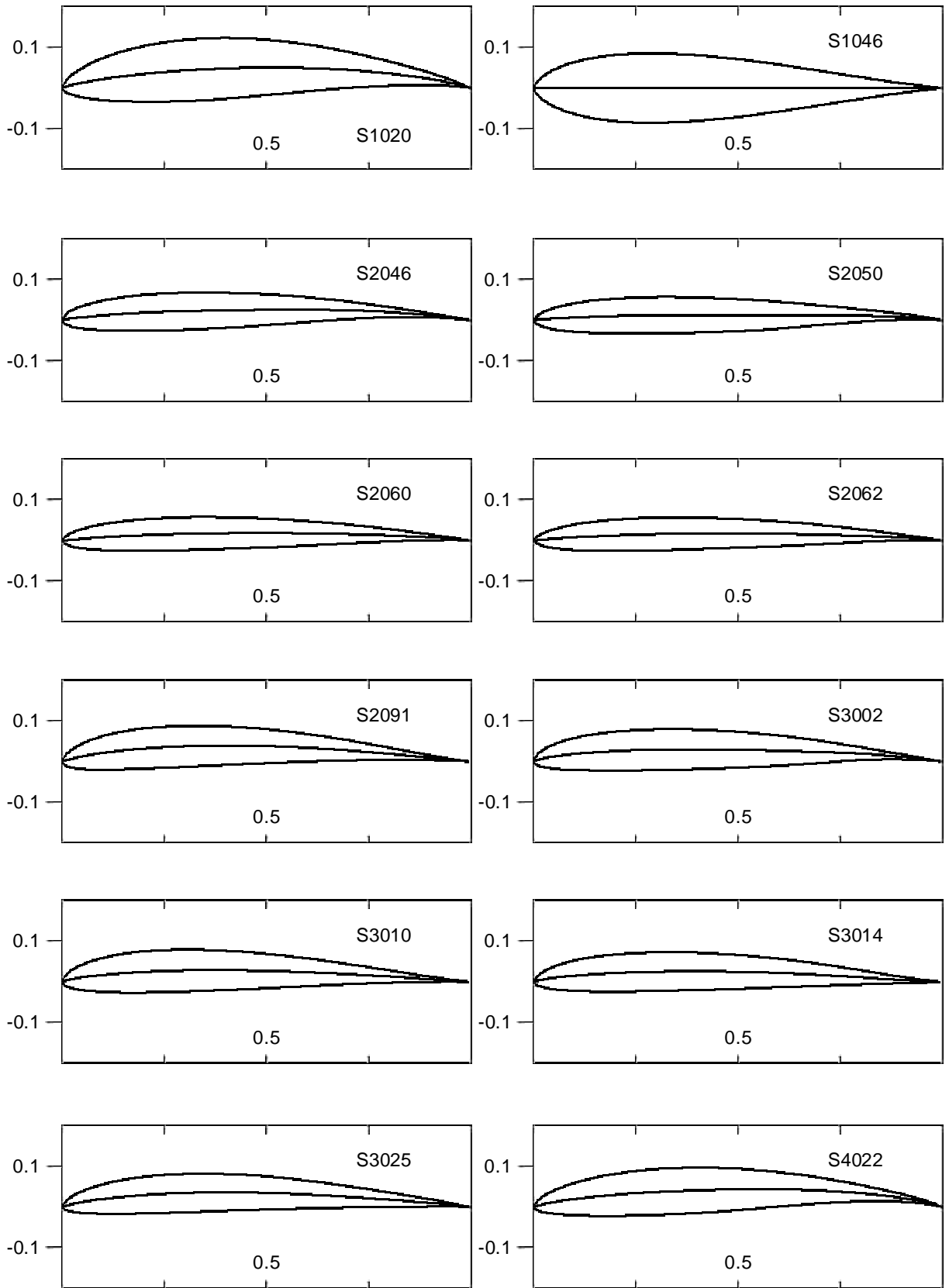


Fig. 4.2.1 Contornos de los perfiles SELIG seleccionados

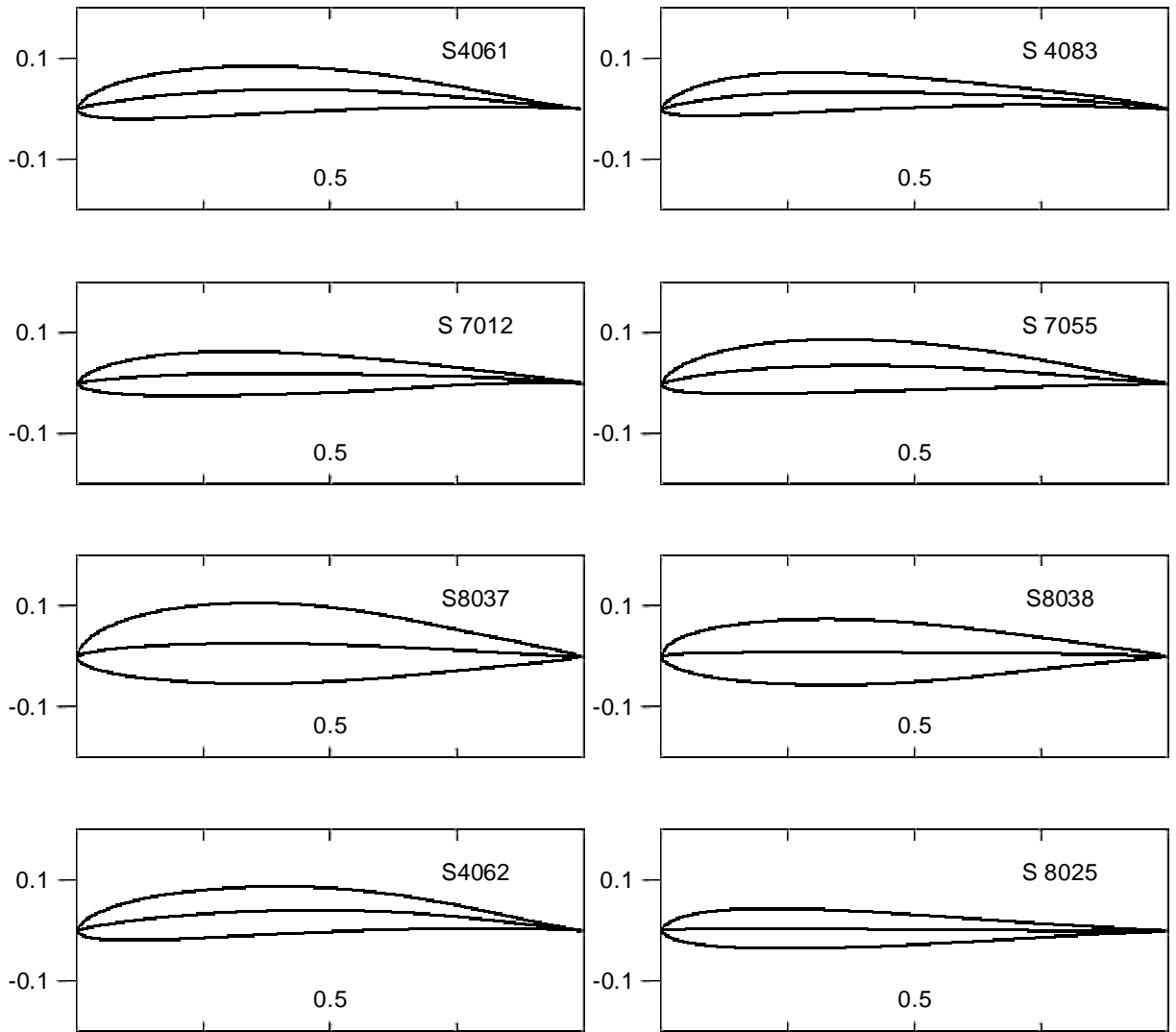


Fig. 4.2.1 Contornos de los perfiles SELIG seleccionados (continuación)

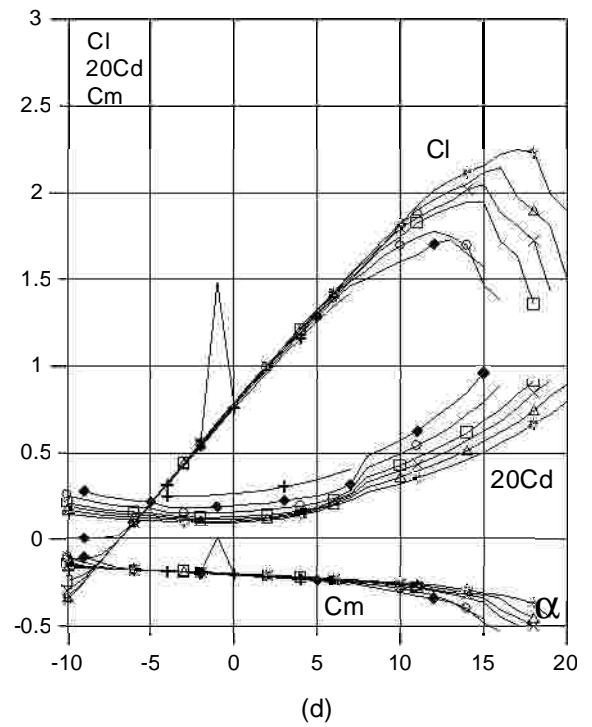
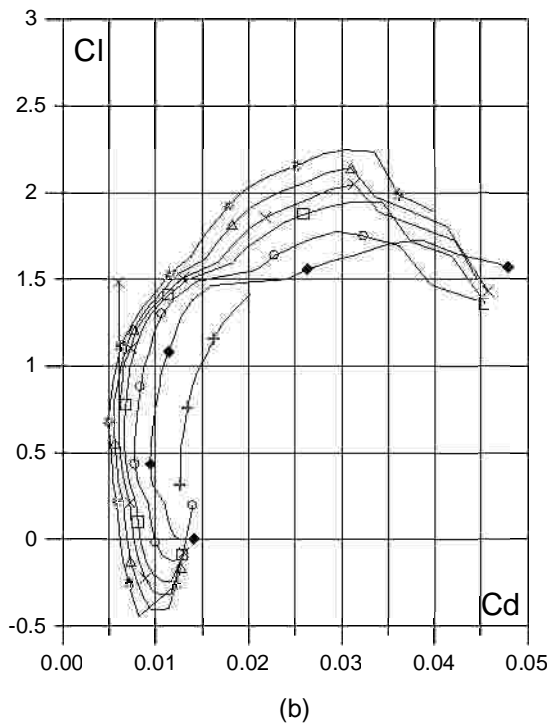
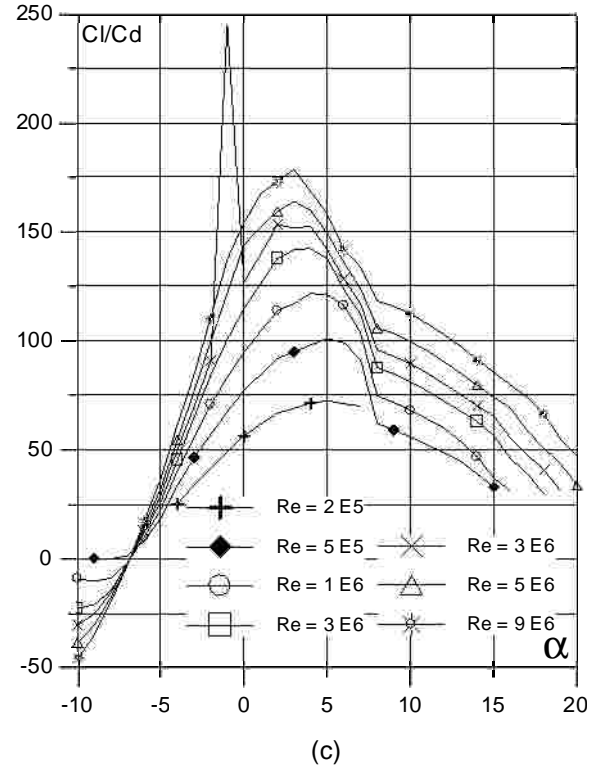
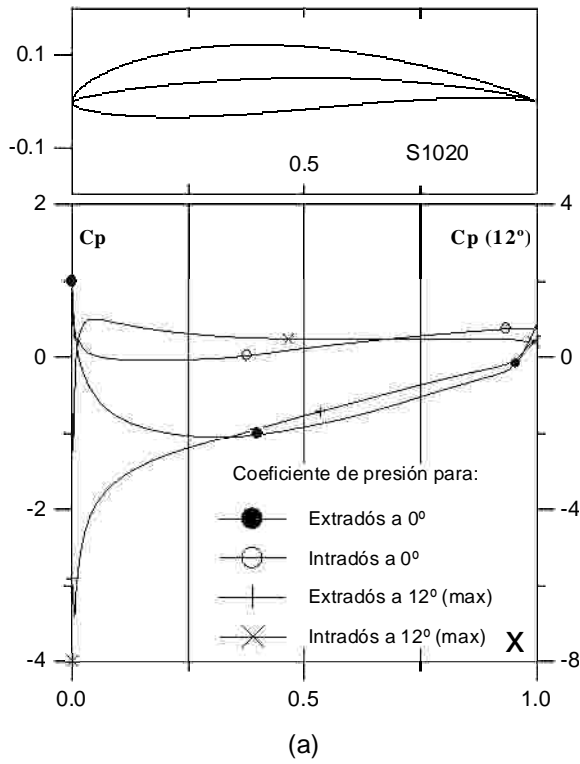


Fig. 4.2.2. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S1020. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.2.2 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S1020.

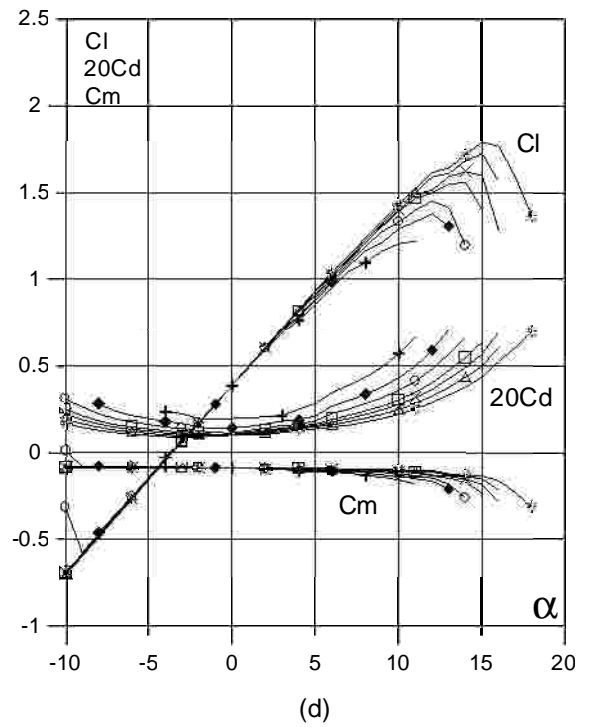
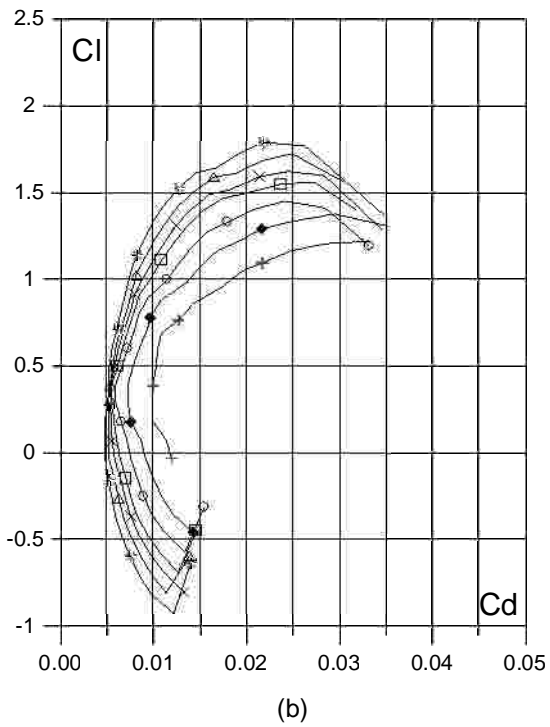
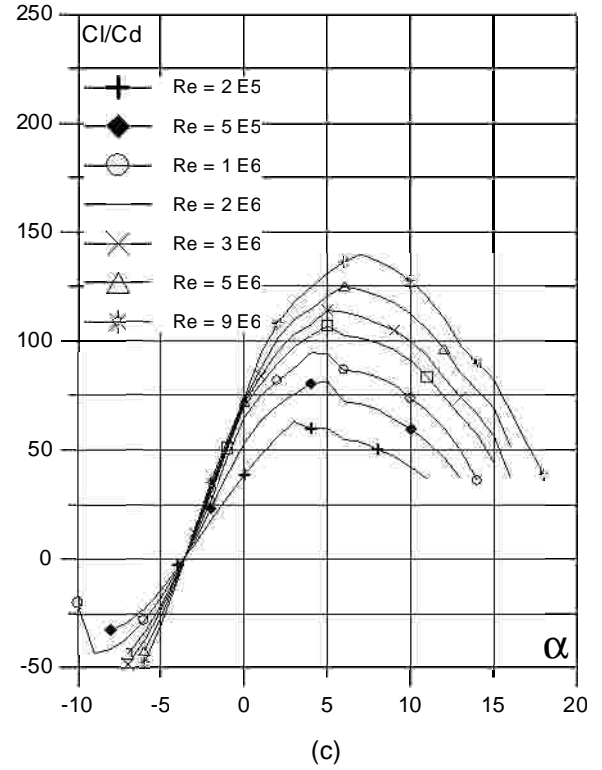
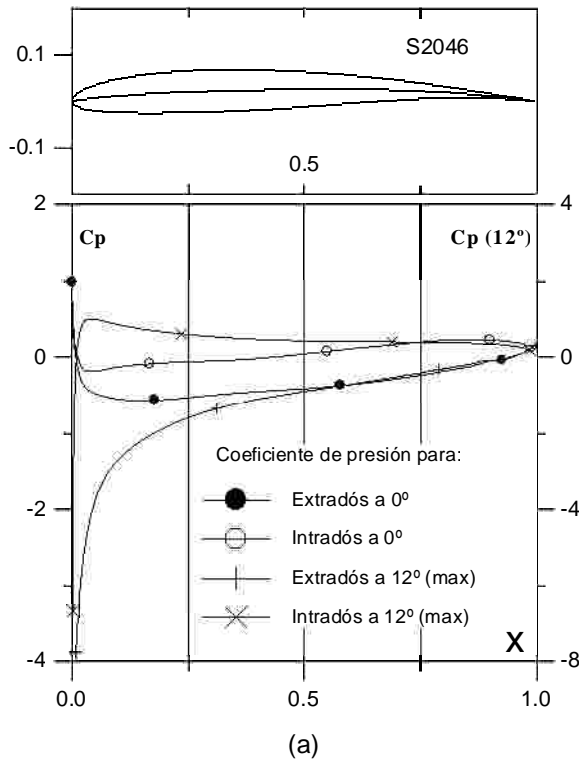


Fig. 4.2.3. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2046. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.3. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S2046.



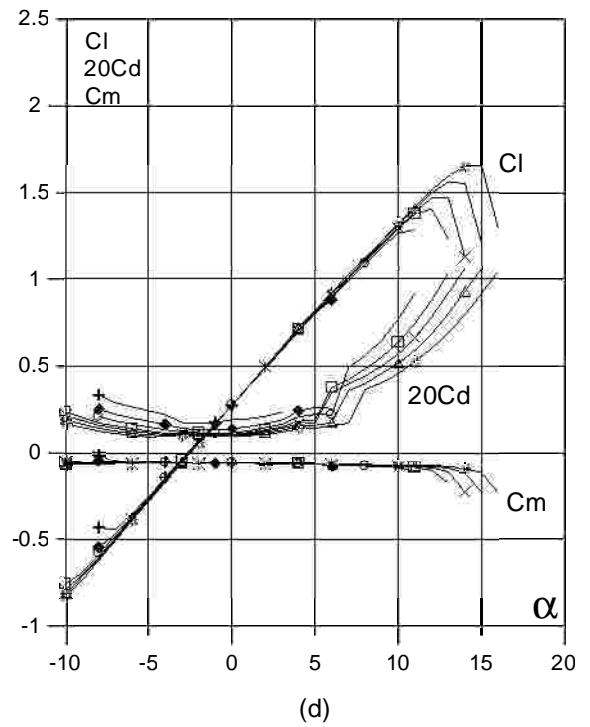
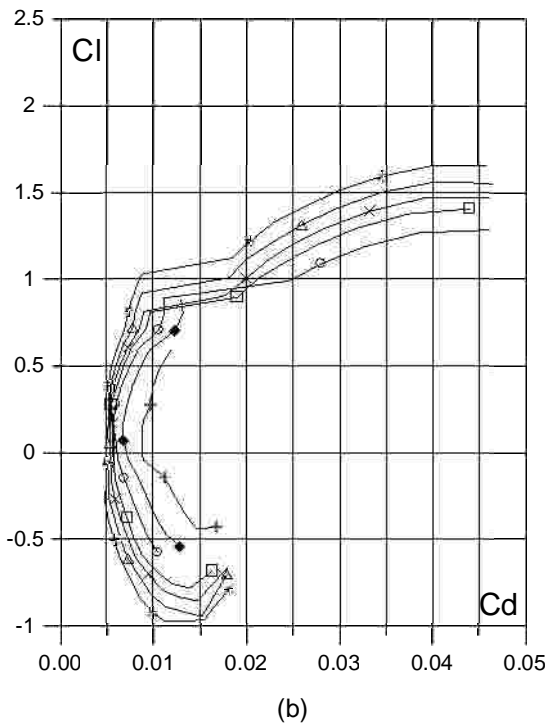
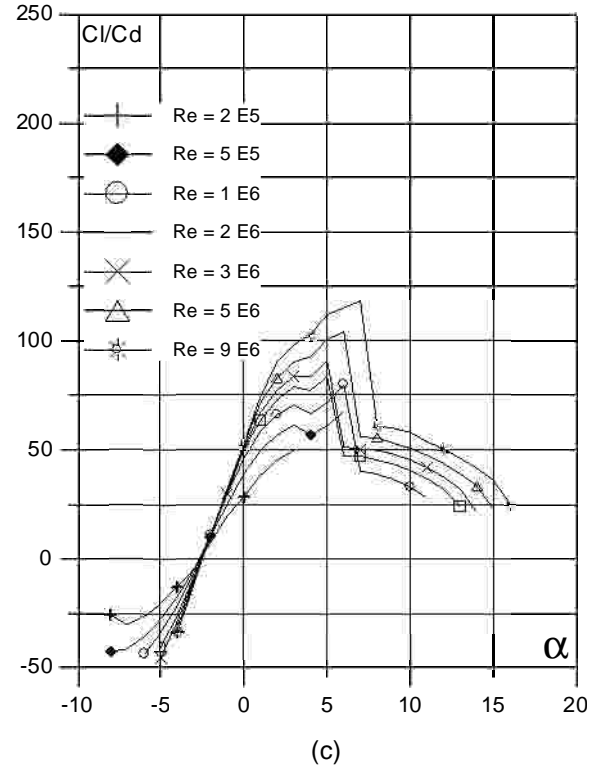
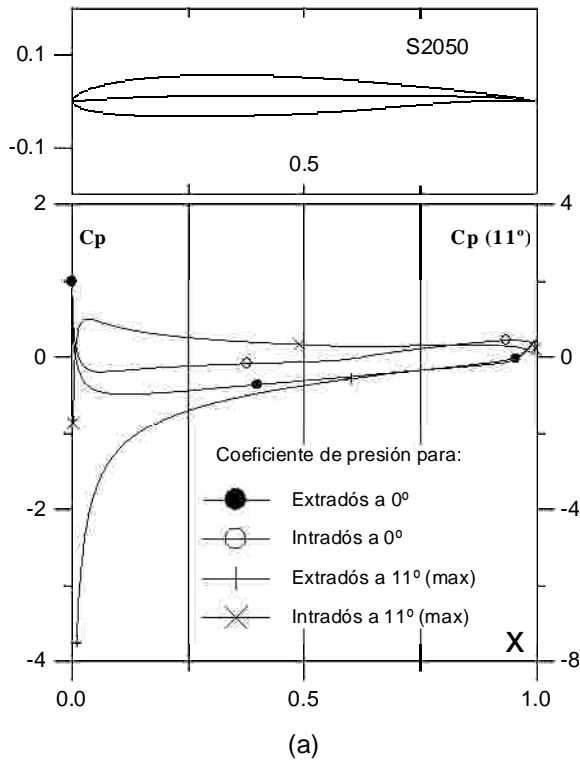


Fig. 4.2.4 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2050. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.2.4. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil S2050.

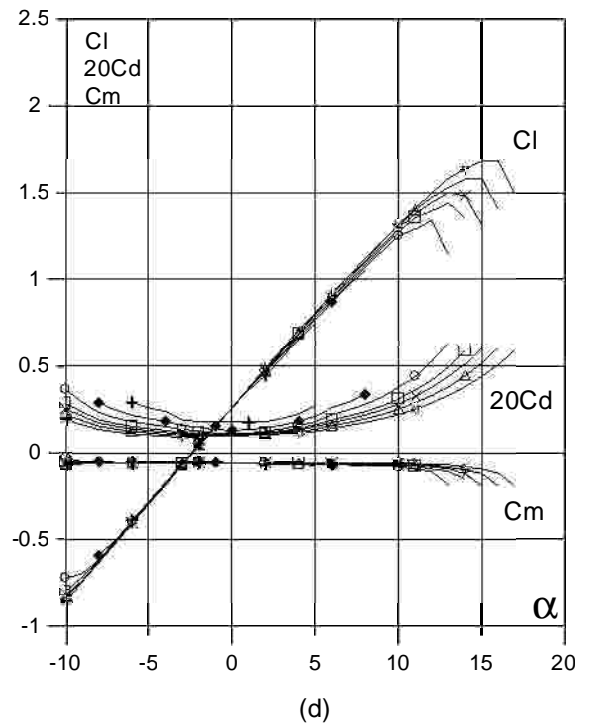
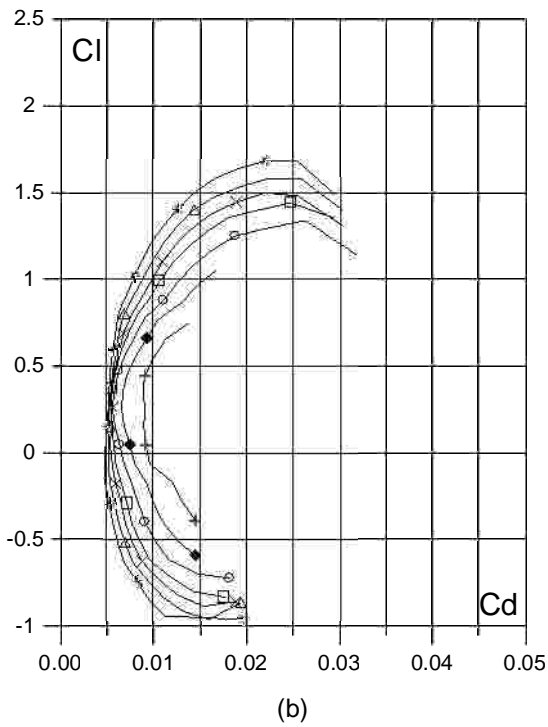
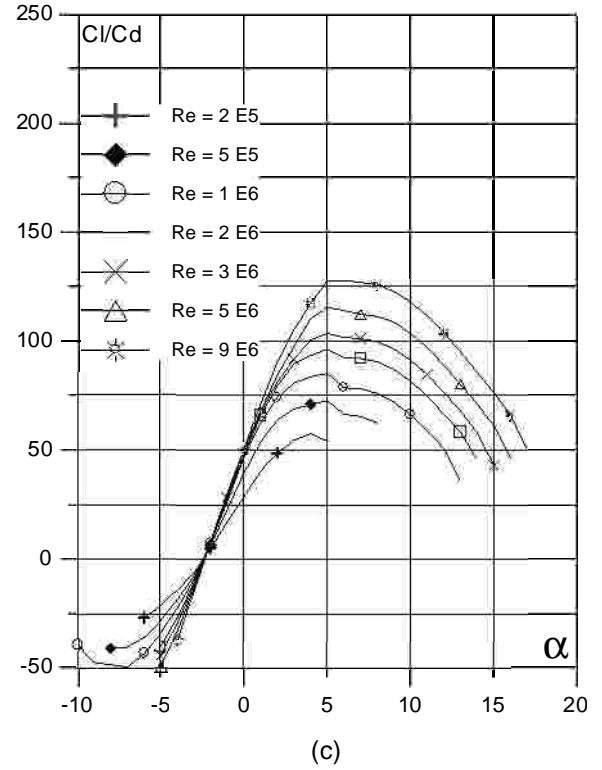
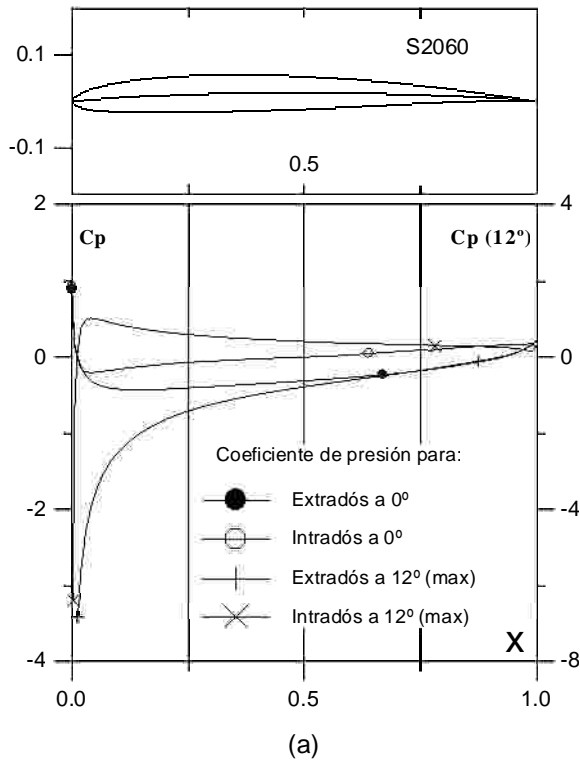


Fig. 4.2.5 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2060. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

Fig. 4.2.5. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S2060.

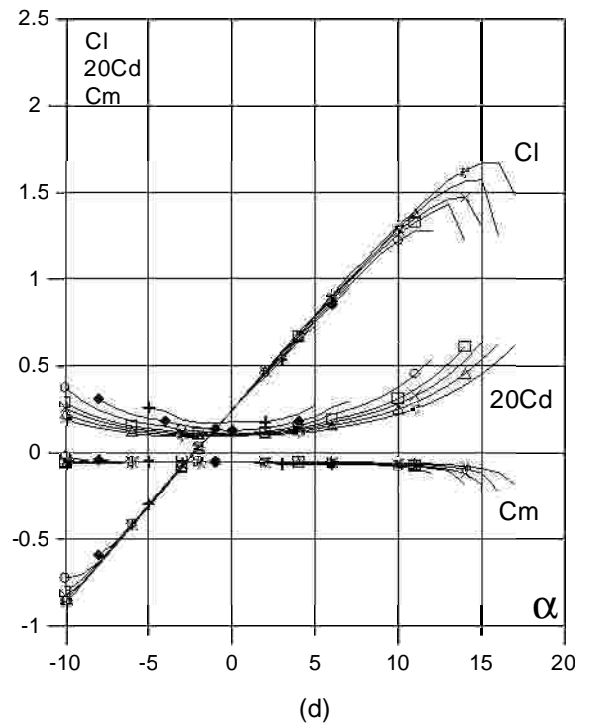
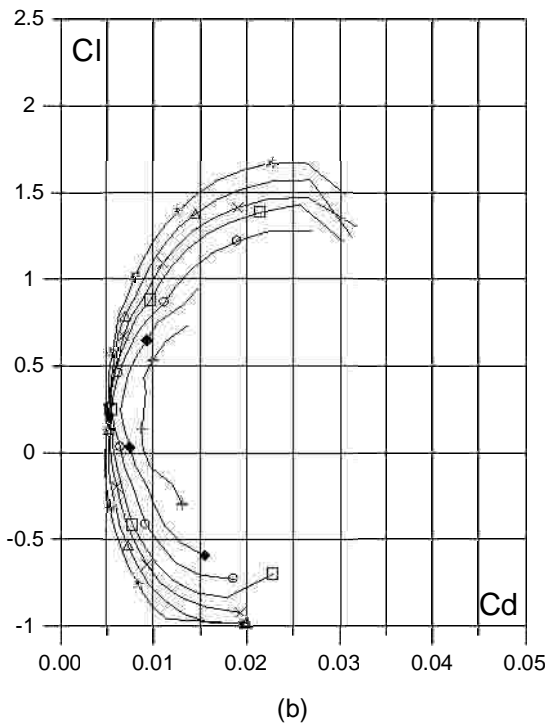
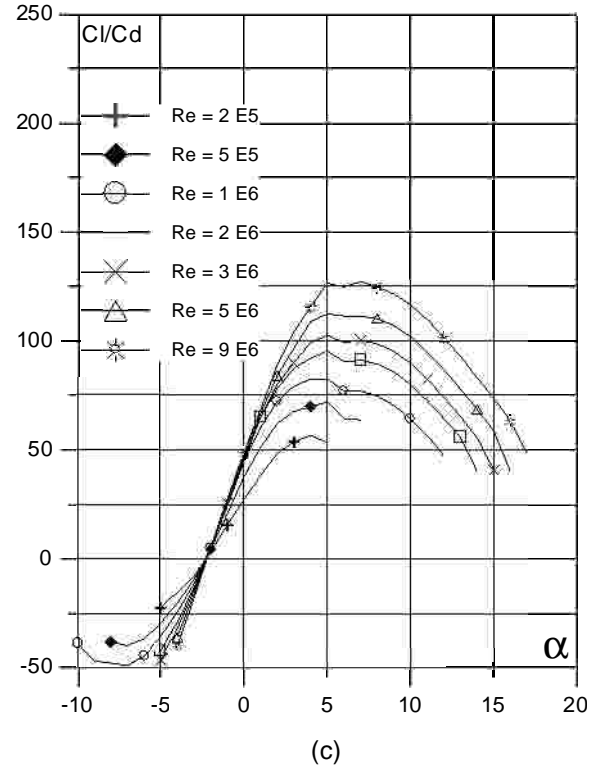
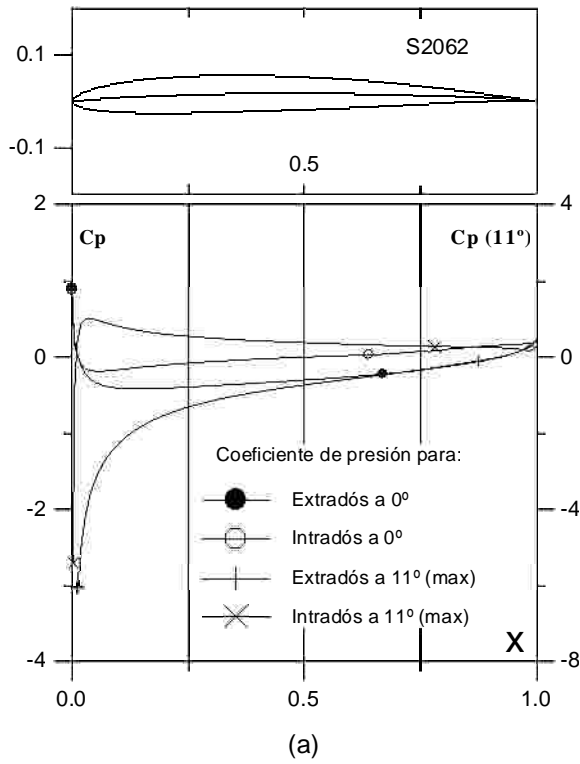


Fig. 4.2.6 (a) Cp ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs. X para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2062. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

Fig. 4.2.6 (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil S2062.

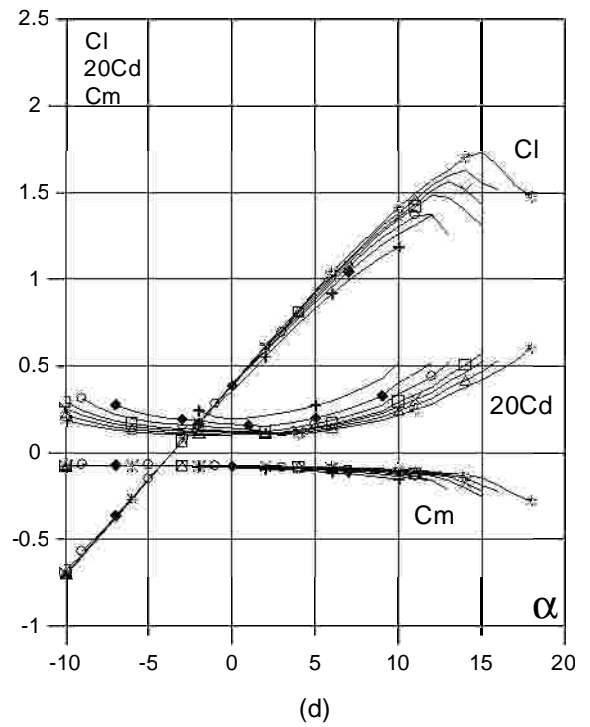
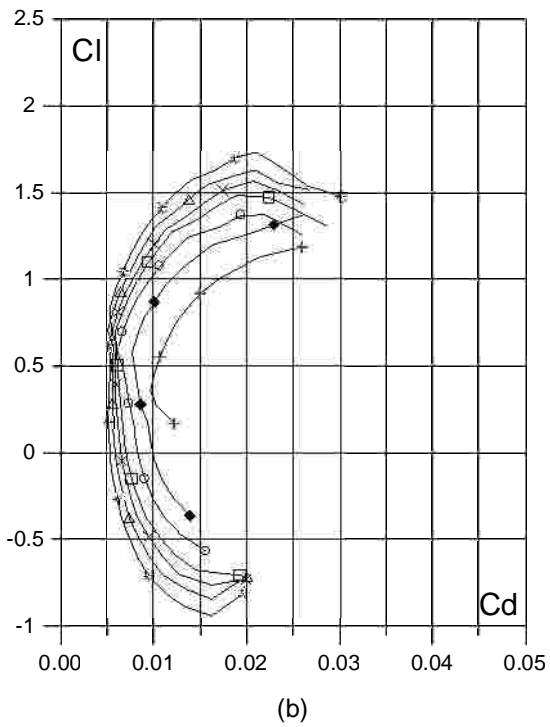
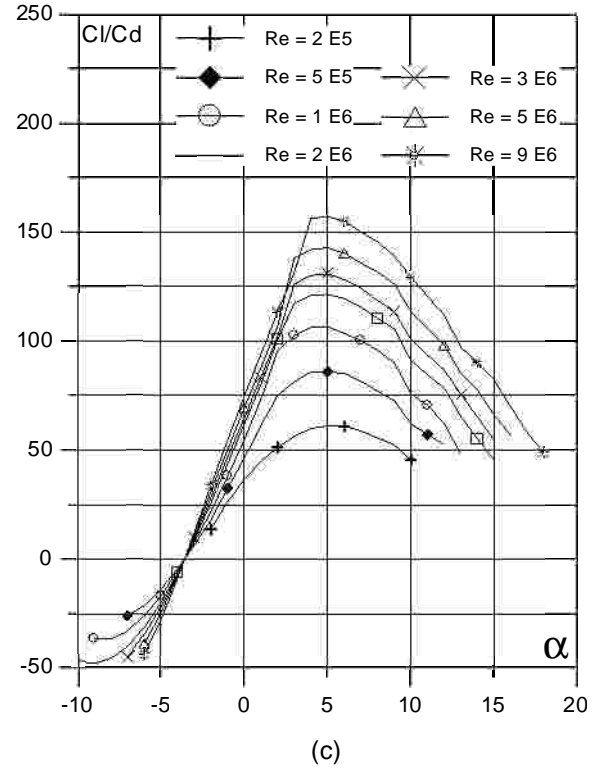
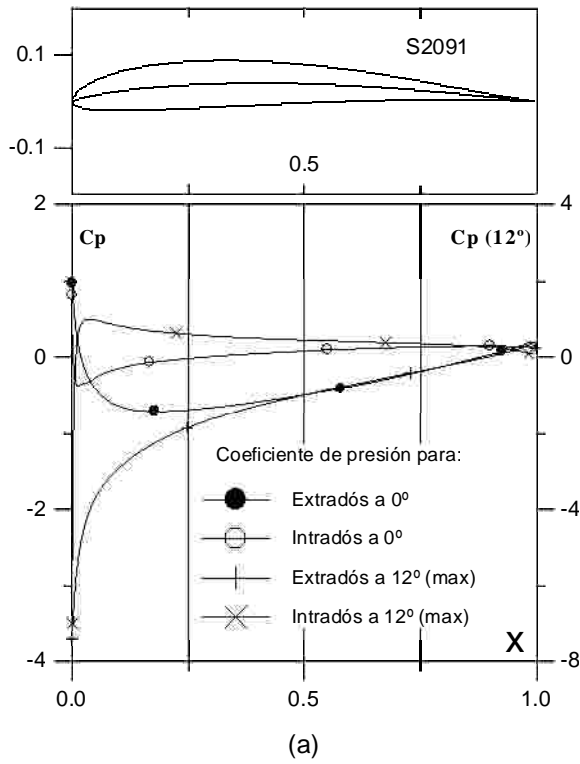


Fig. 4.2.7 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S2091. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.7 (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil S2091.

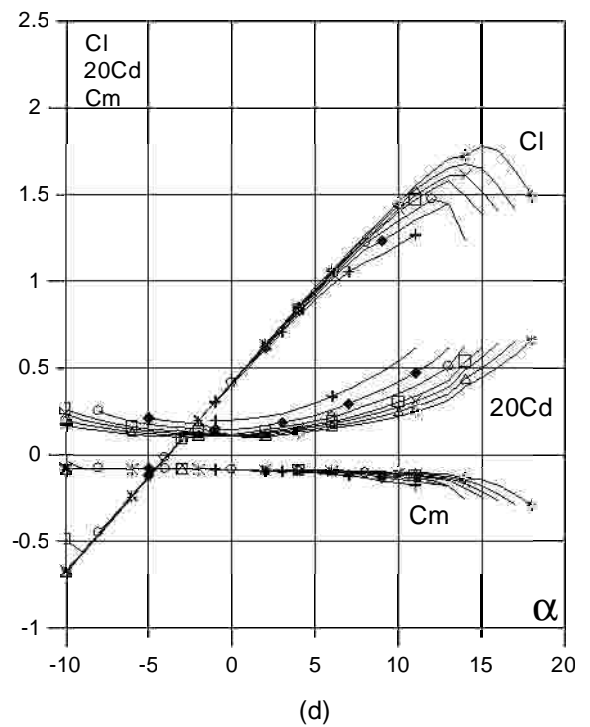
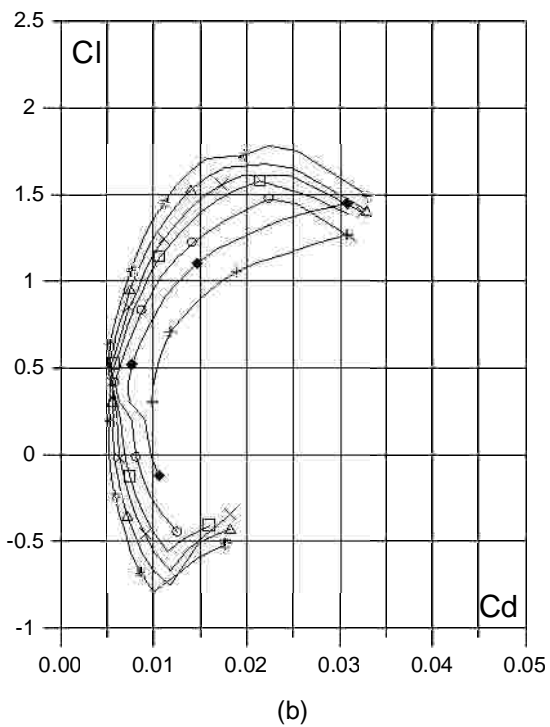
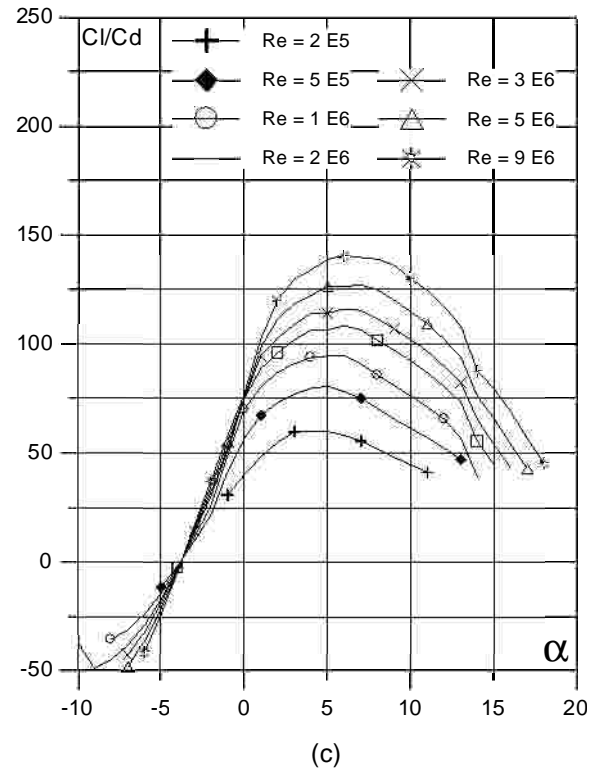
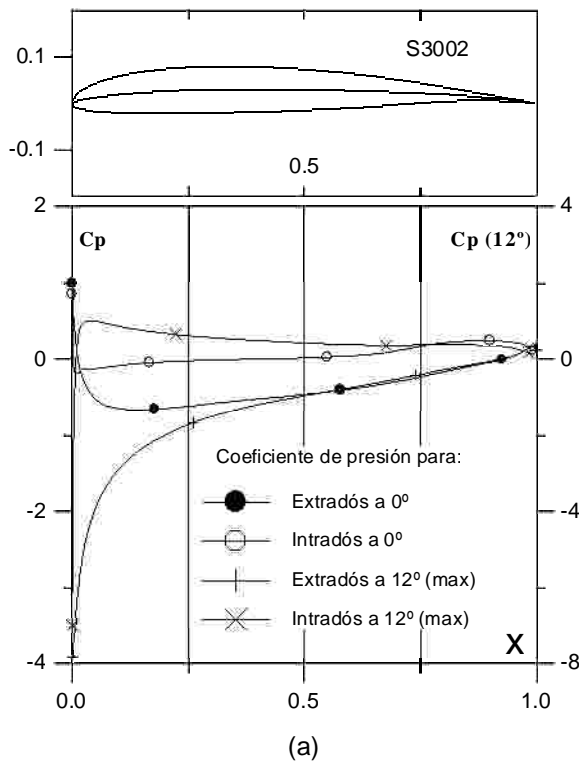


Fig. 4.2.8. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S3002. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.8 (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil S3002.

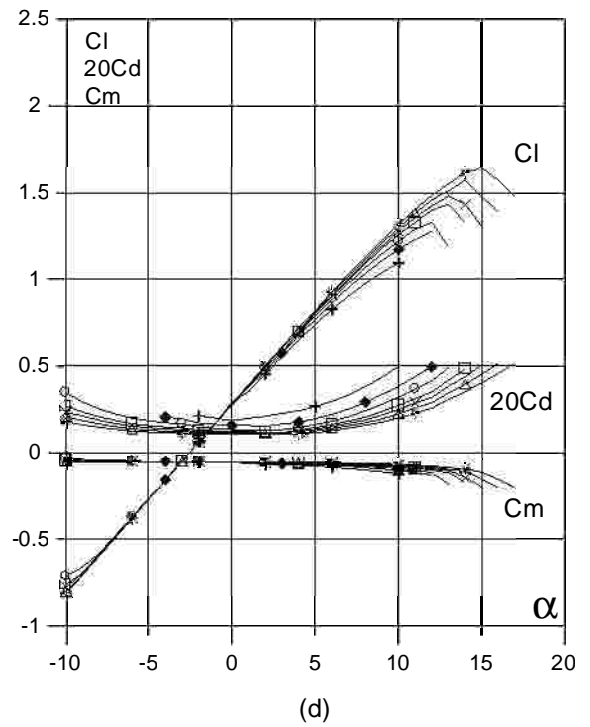
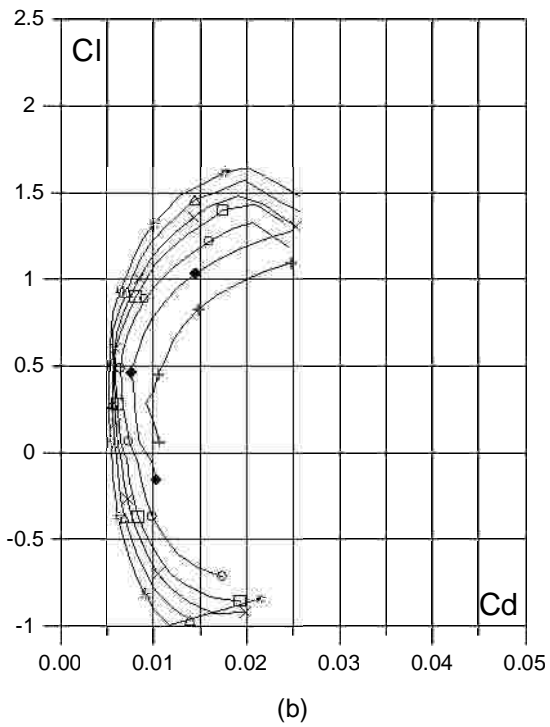
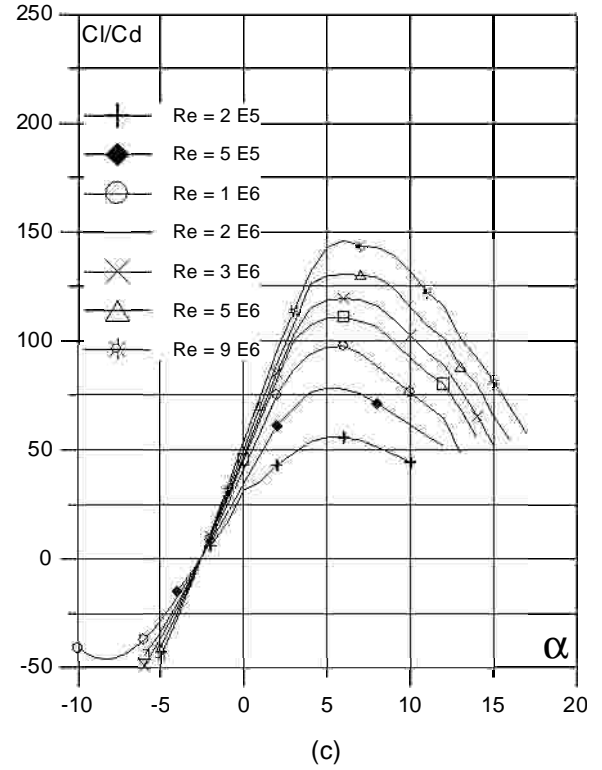
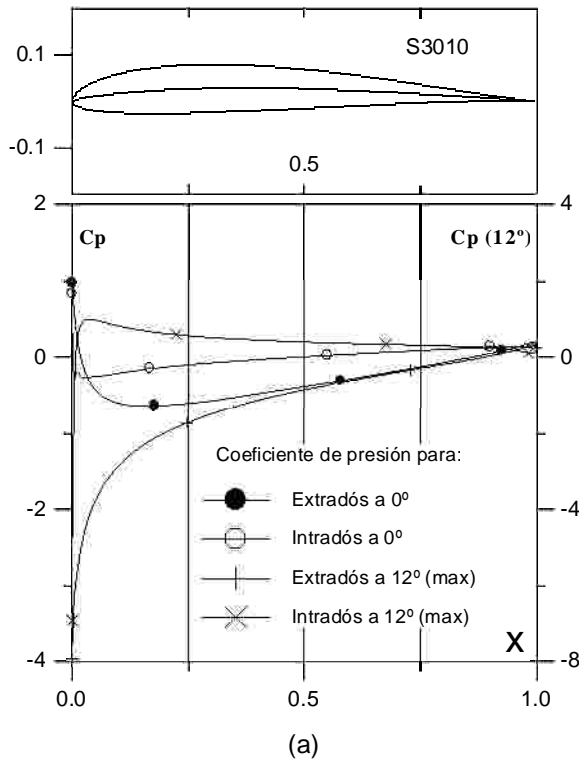


Fig. 4.2.9 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S3010. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.9 (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil S3010.

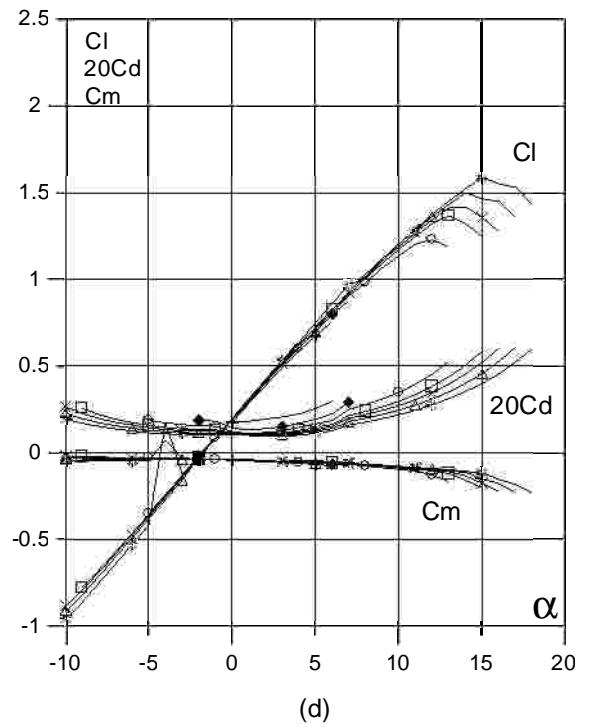
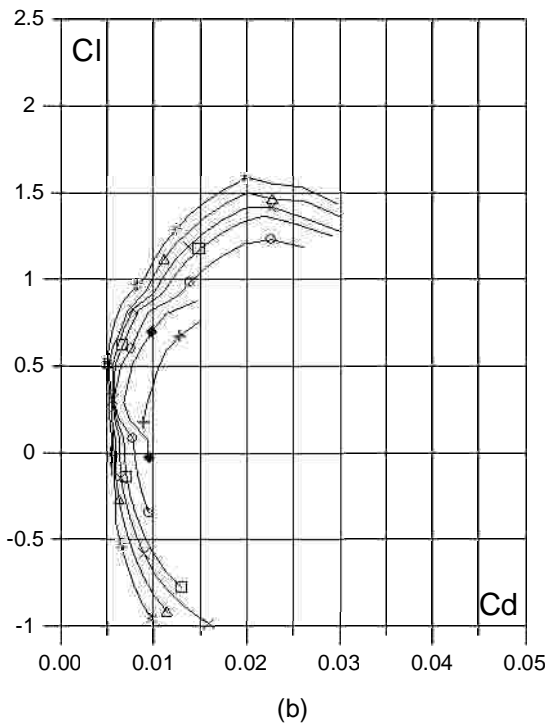
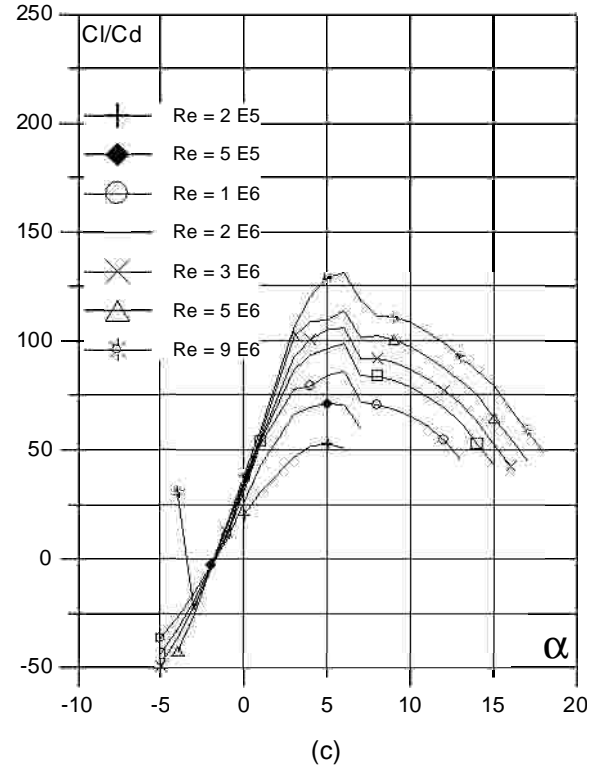
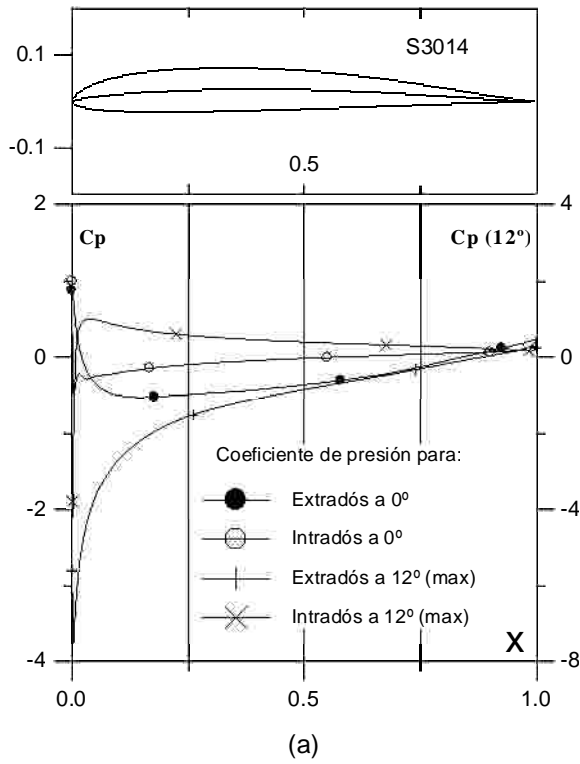


Fig. 4.2.10. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S3014. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.10. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil S3014.

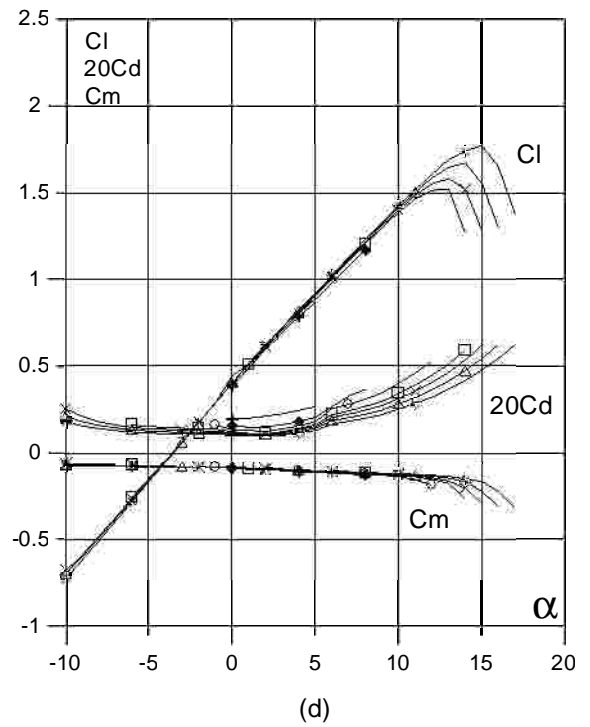
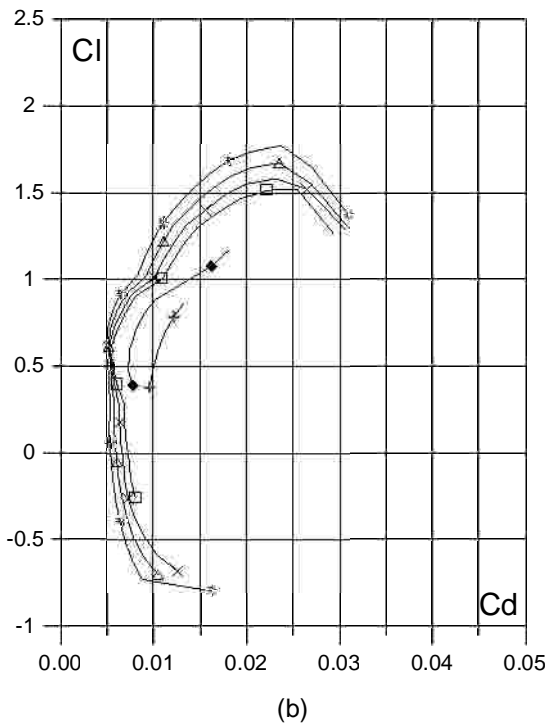
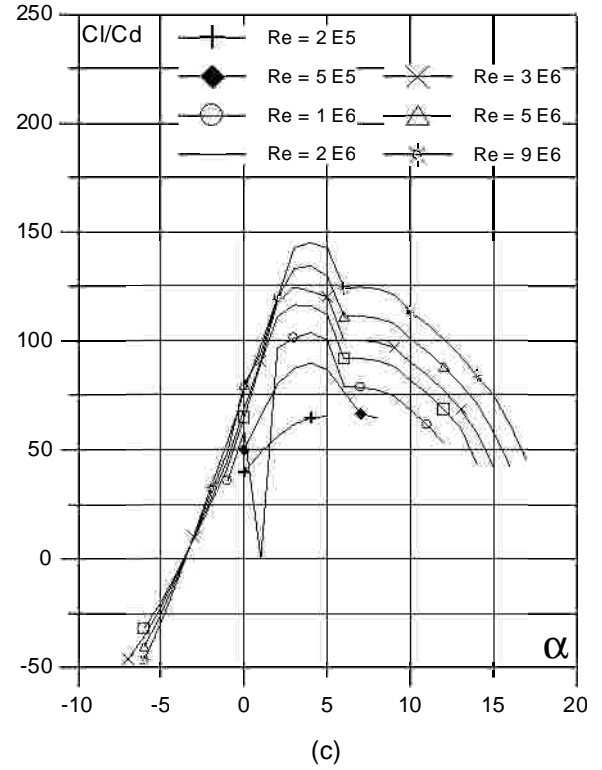
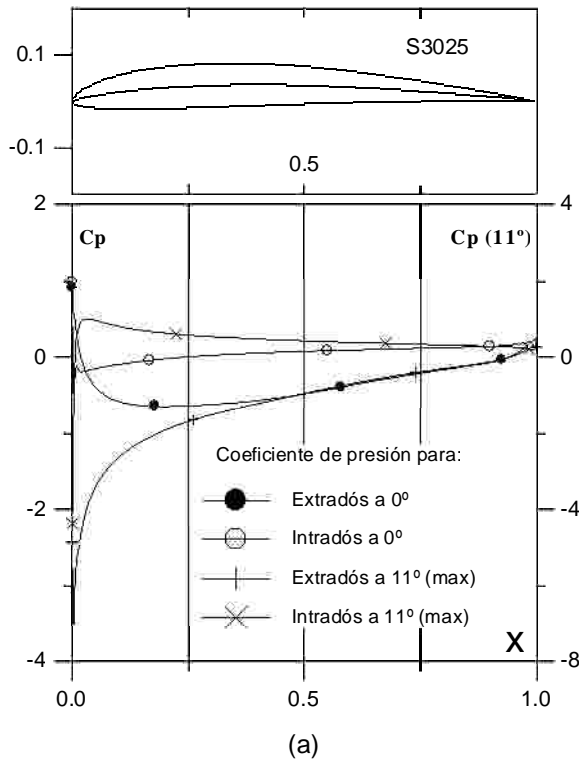


Fig. 4.2.11. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S3025. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.11 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S3025.



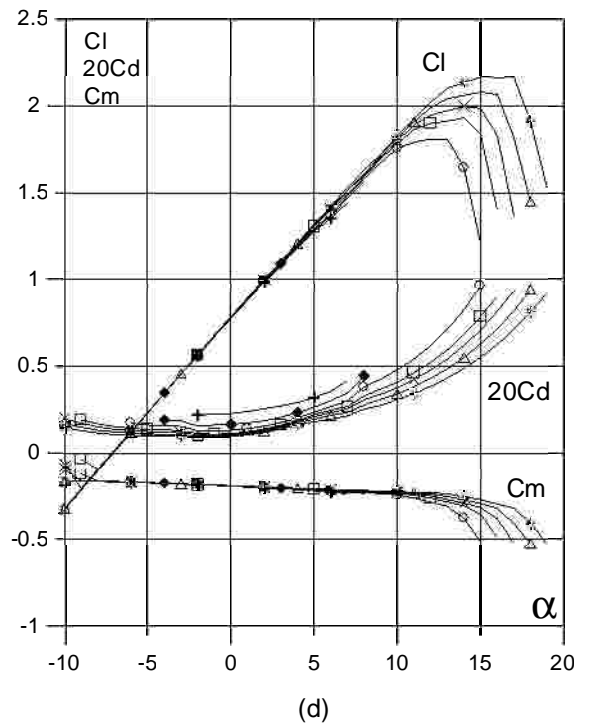
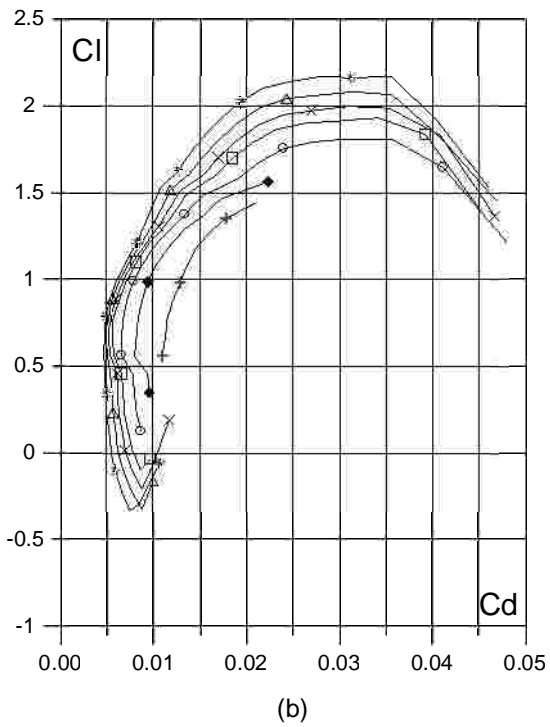
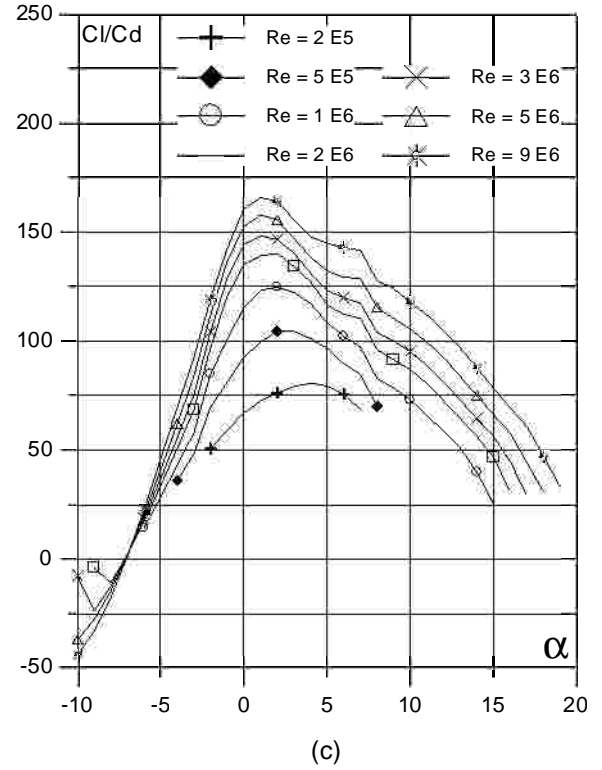
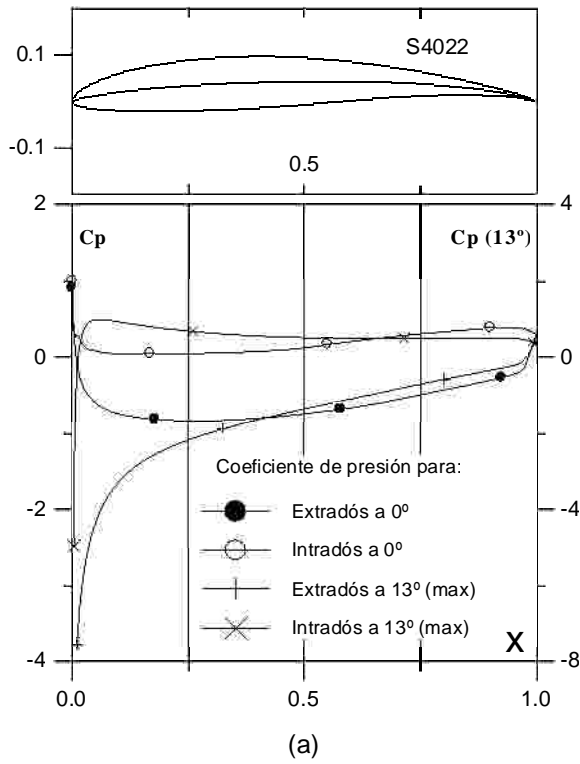


Fig. 4.2.12. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S4022. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.12. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S4022.

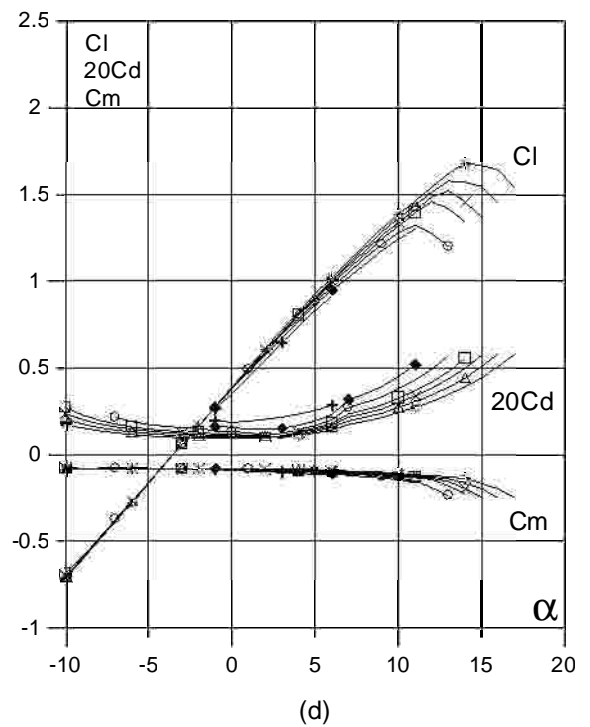
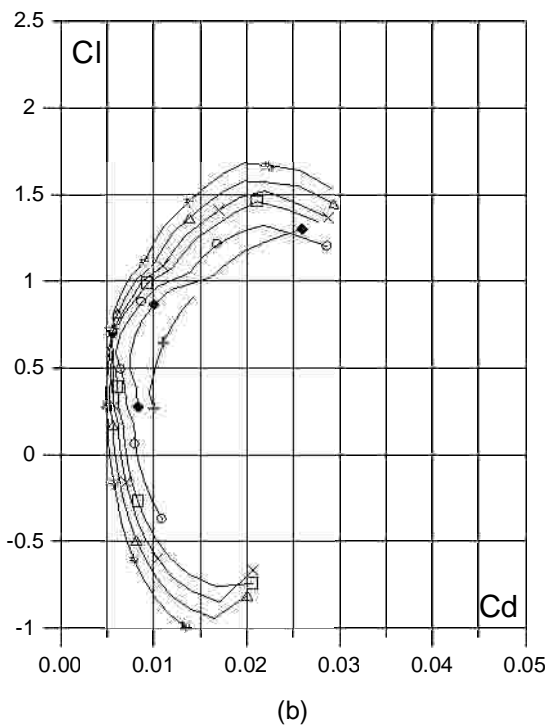
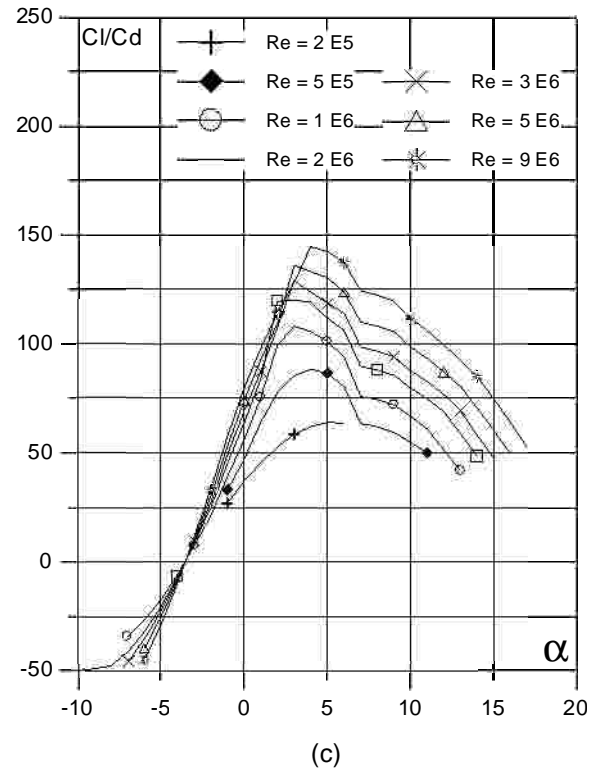
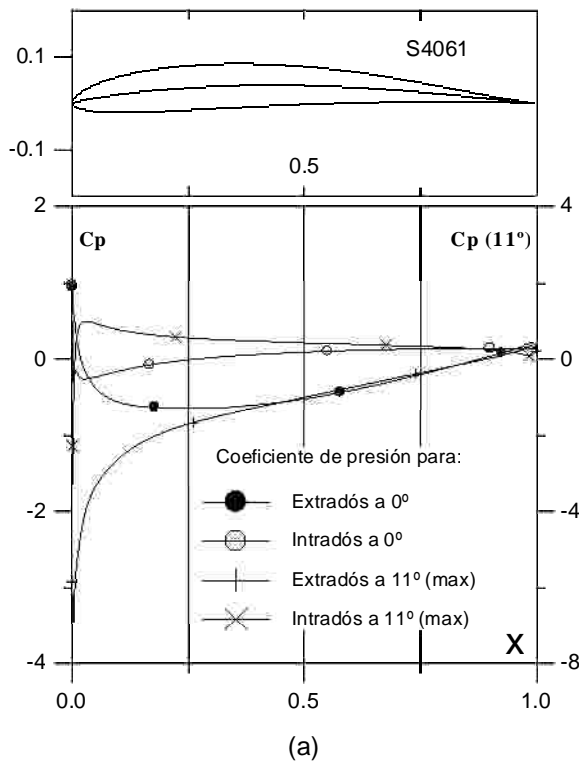


Fig. 4.2.13. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S4061. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.13. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S4061.

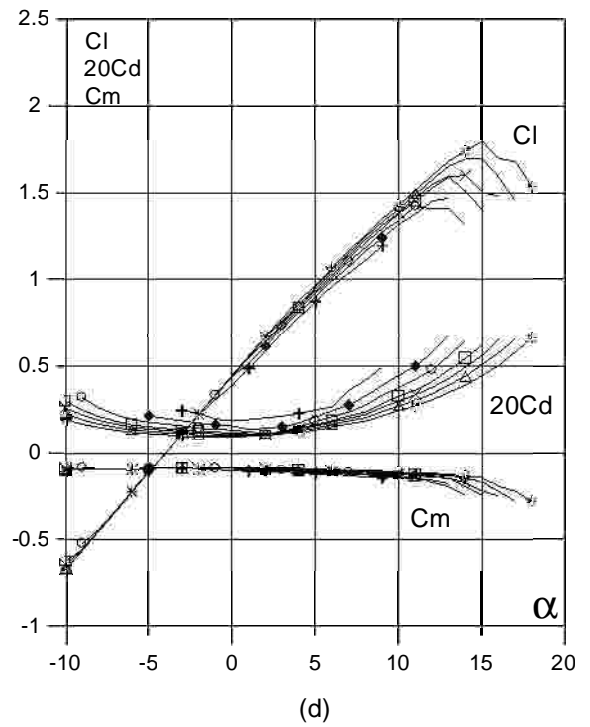
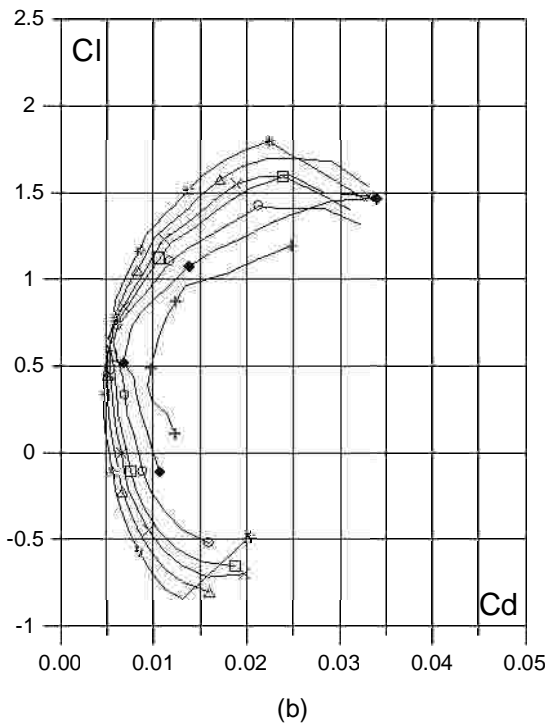
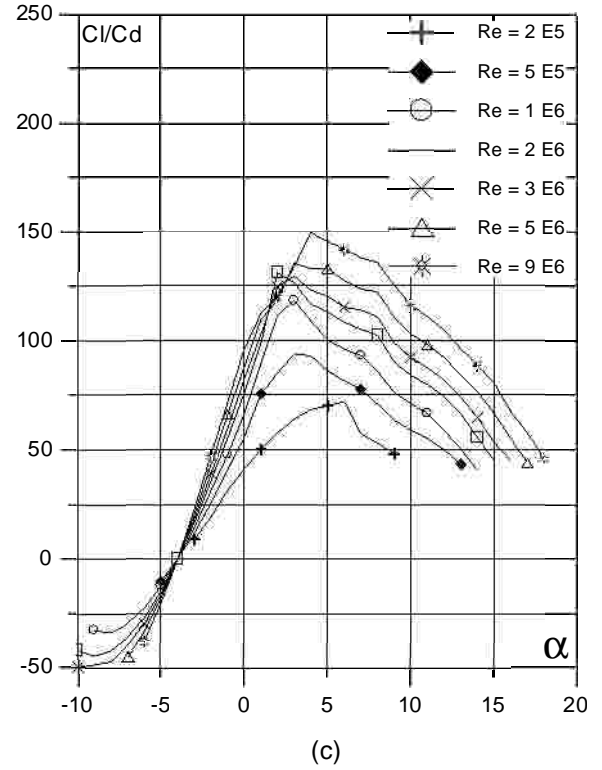
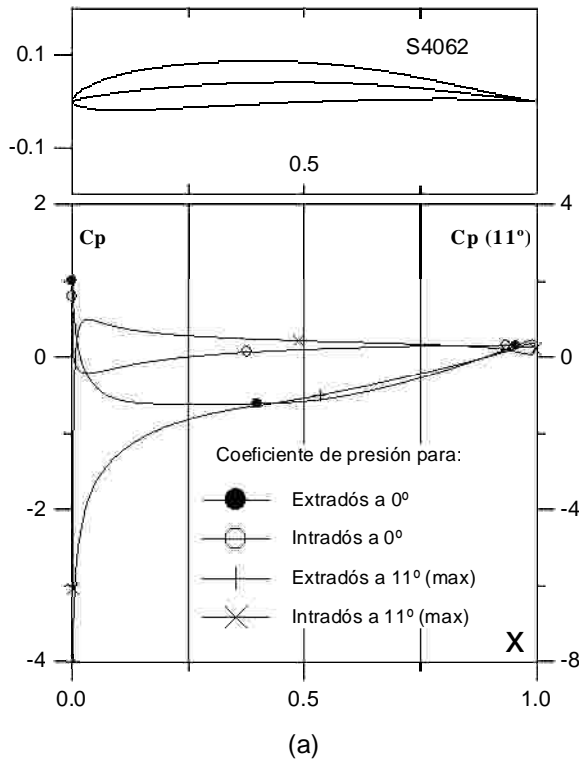


Fig. 4.2.14. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S4062. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.2.14. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S4062.

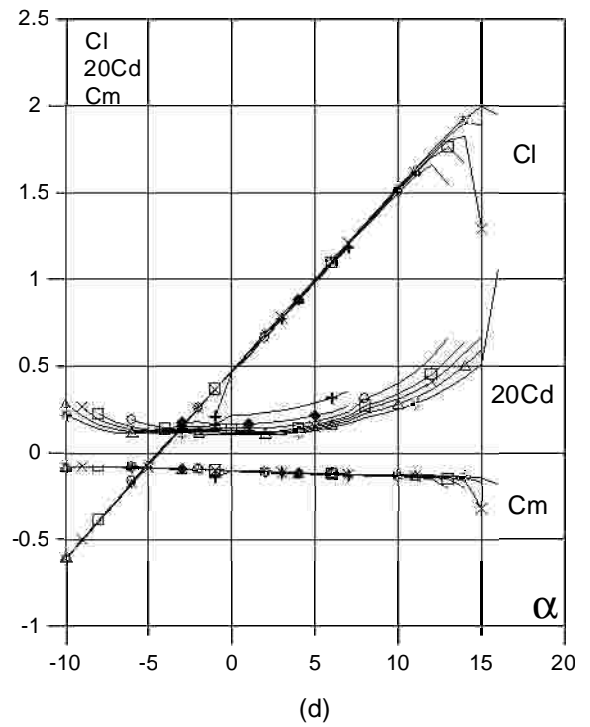
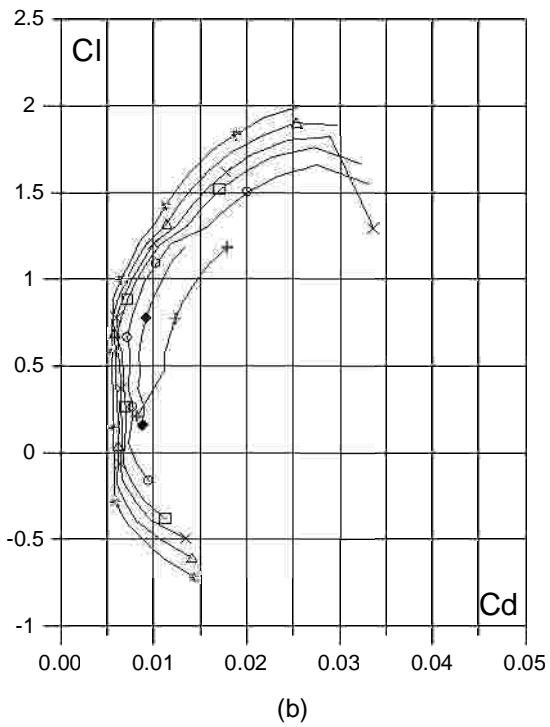
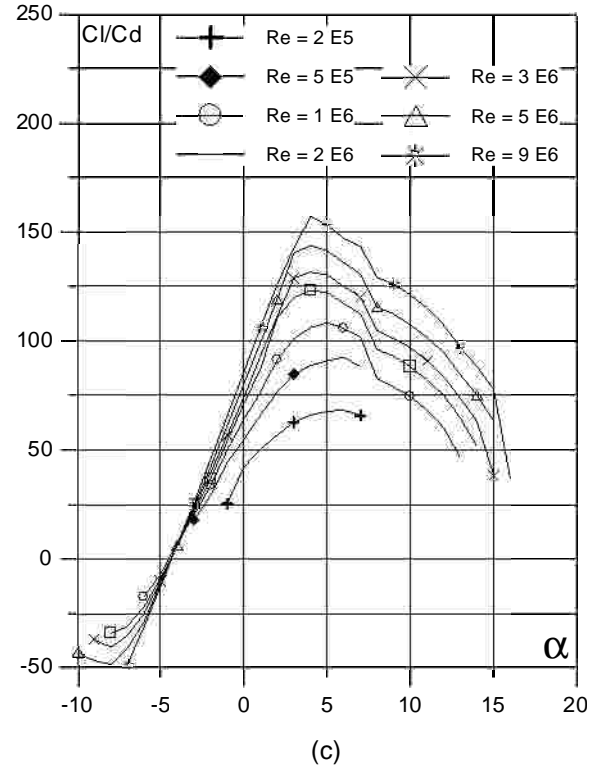
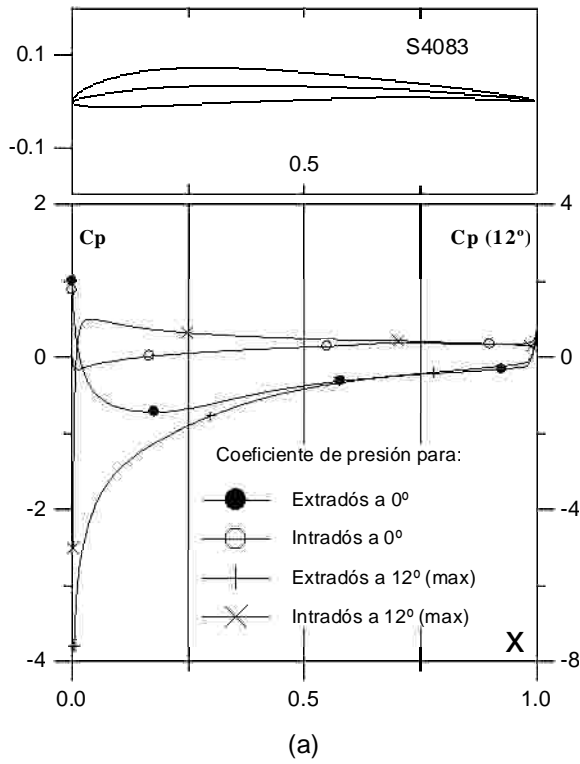


Fig. 4.2.15. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S4083. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.15. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S4083.

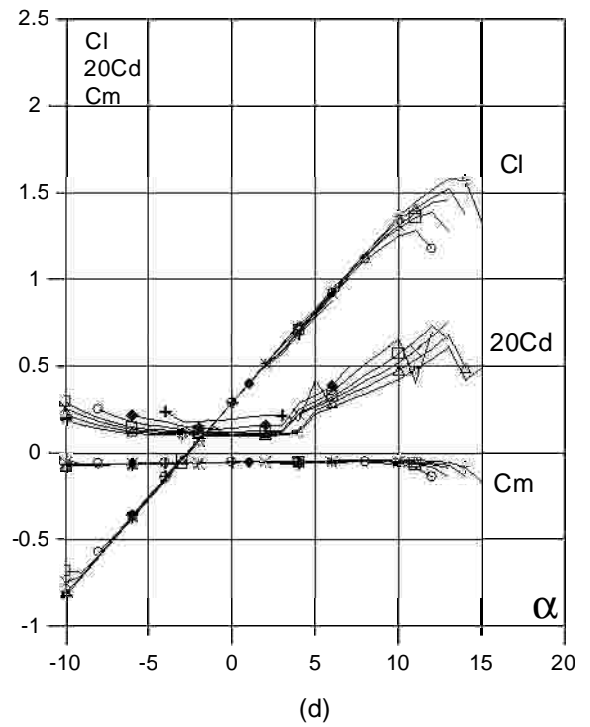
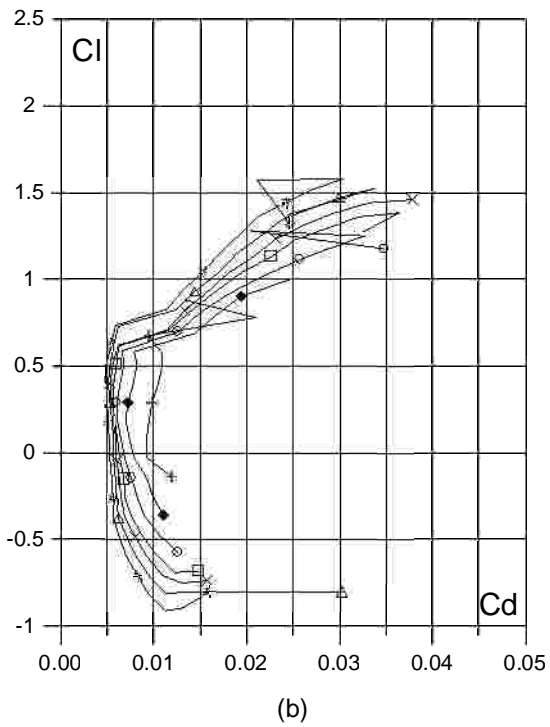
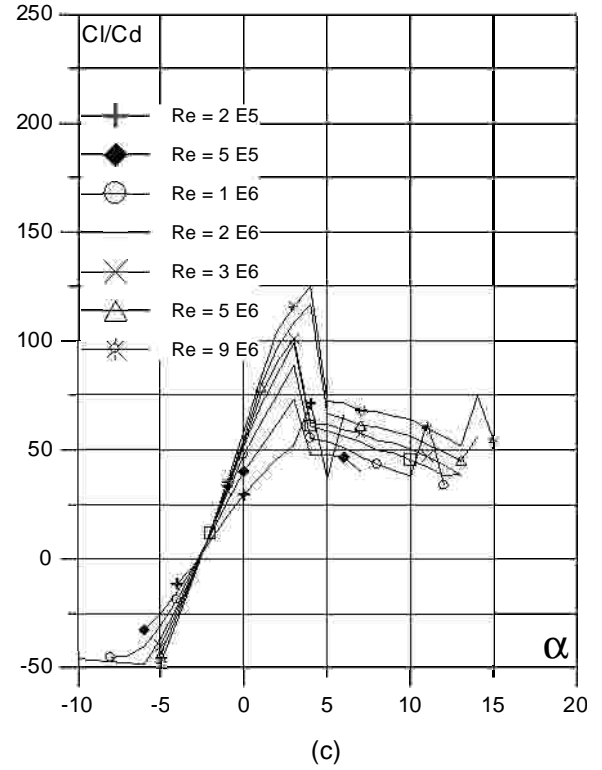
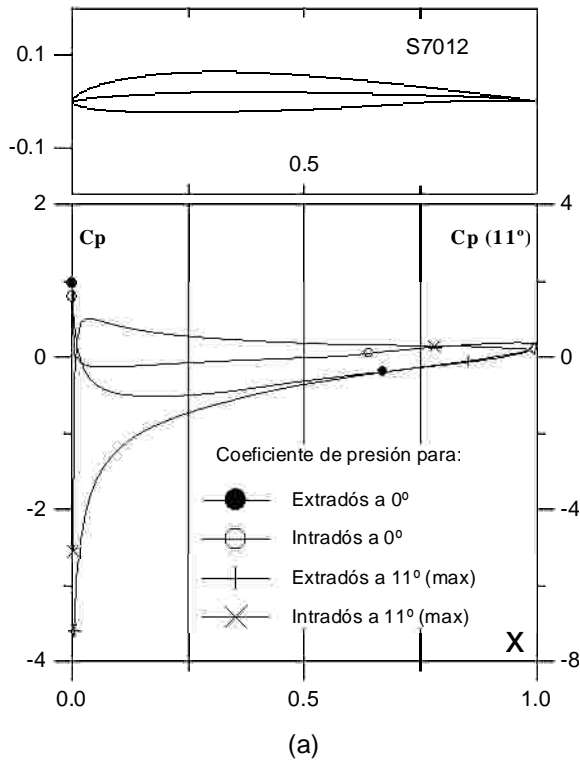


Fig. 4.2.16. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S7012. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

Fig. 4.2.16. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S7012.

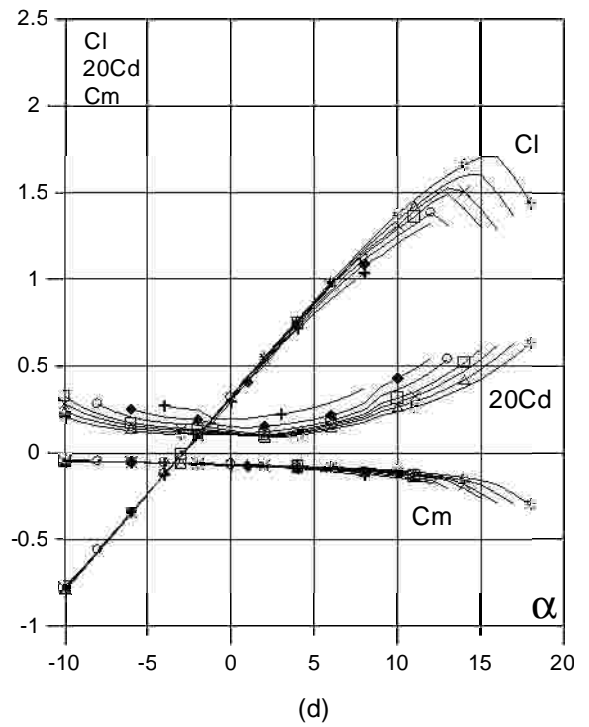
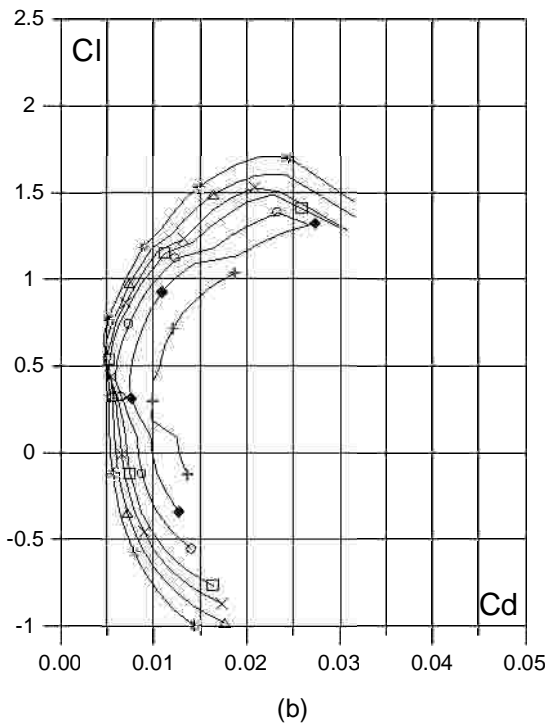
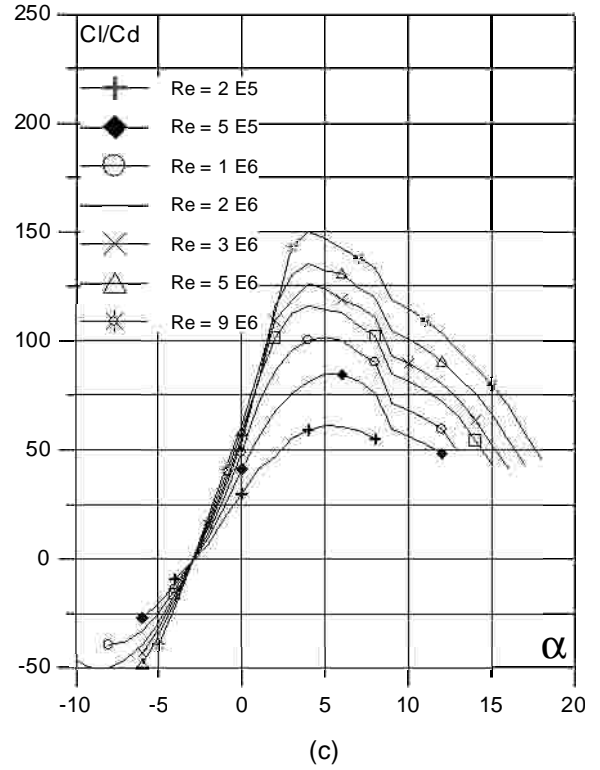
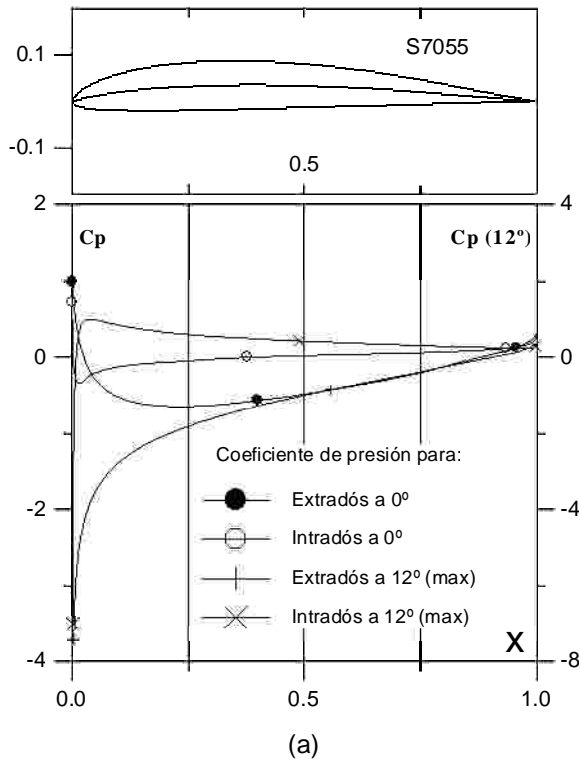


Fig. 4.2.17. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S7055. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.2.17. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S7055.

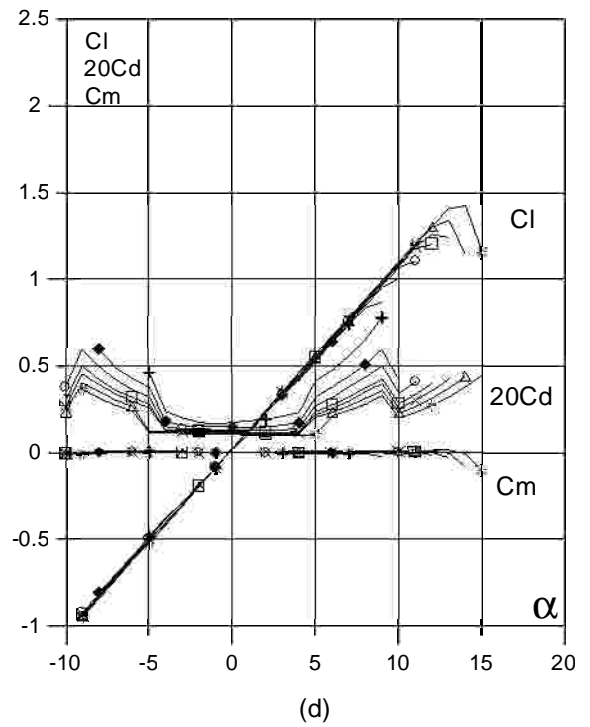
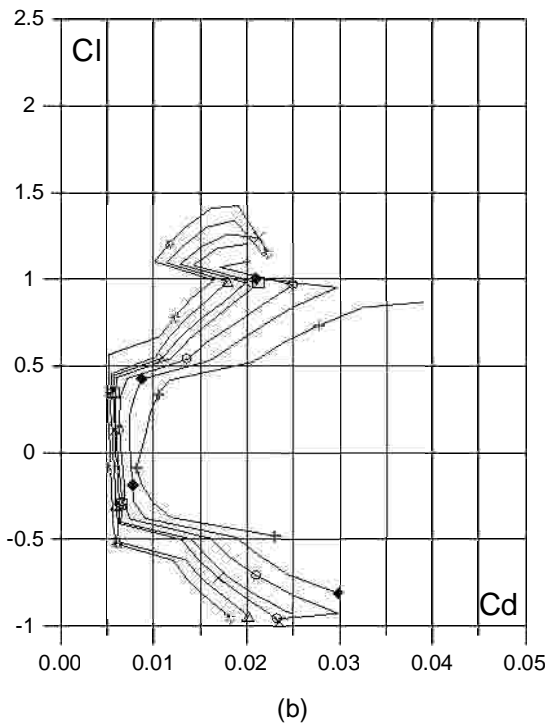
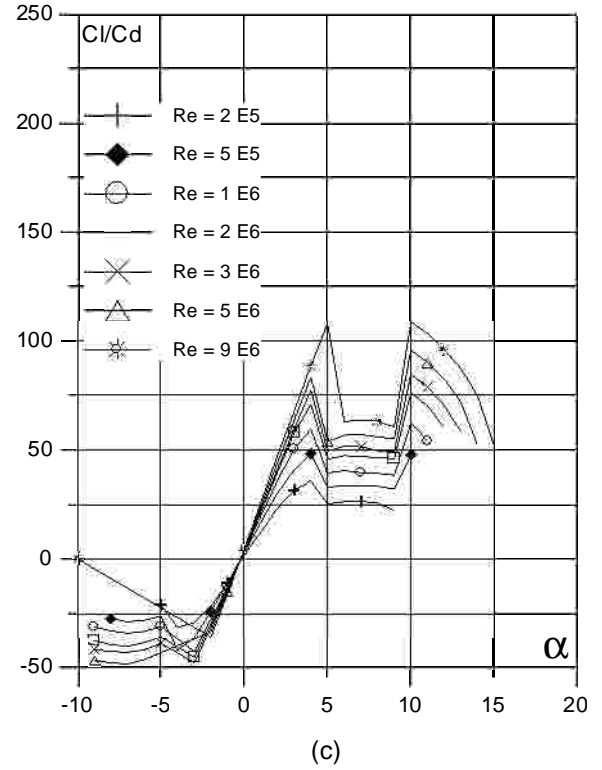
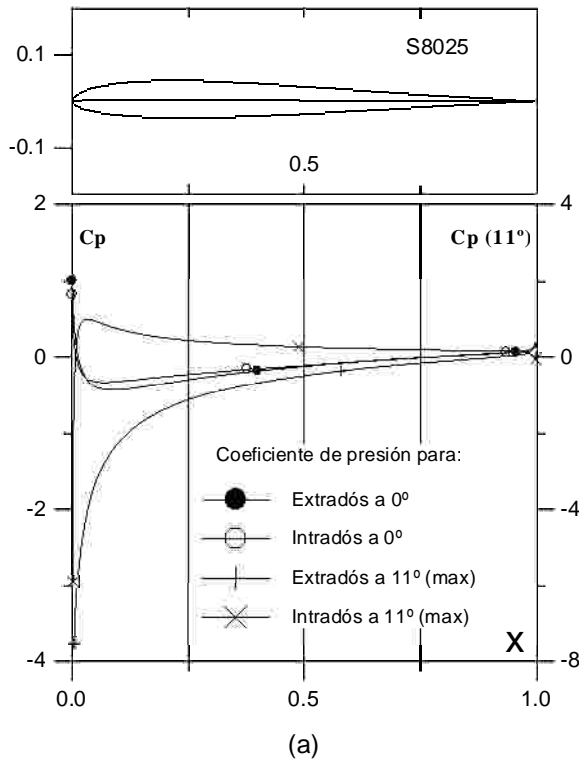


Fig. 4.2.18. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S8025. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.2.18. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil S8025.

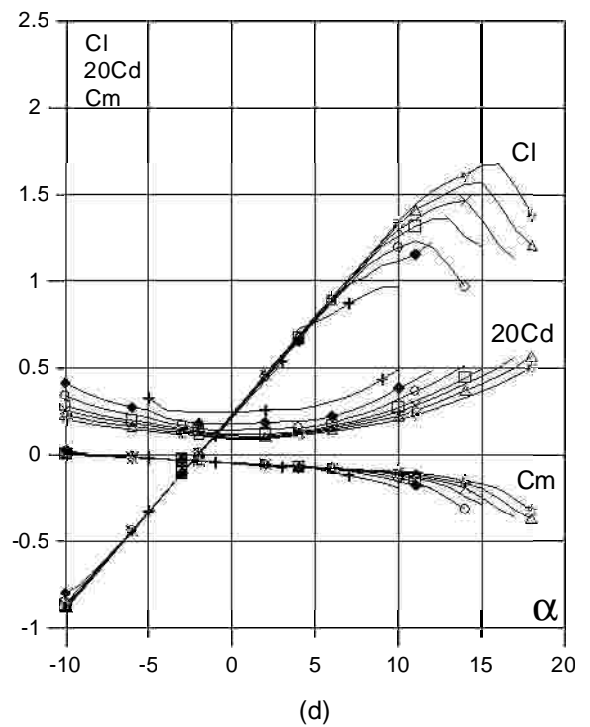
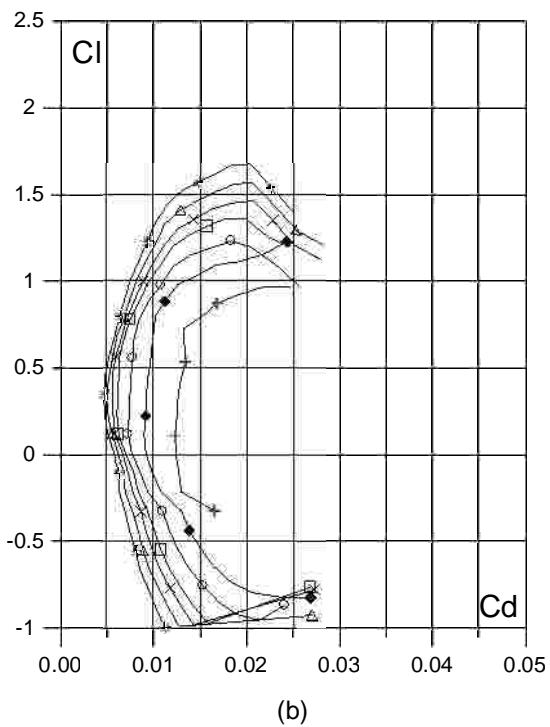
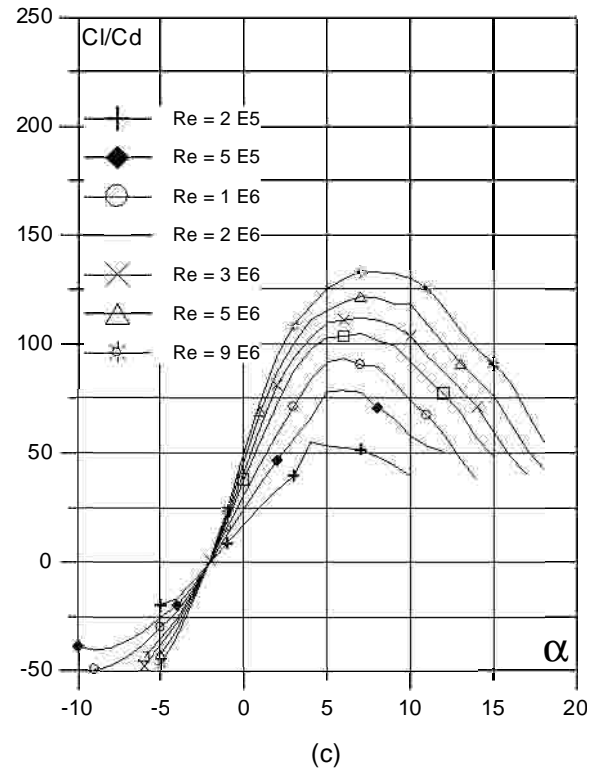
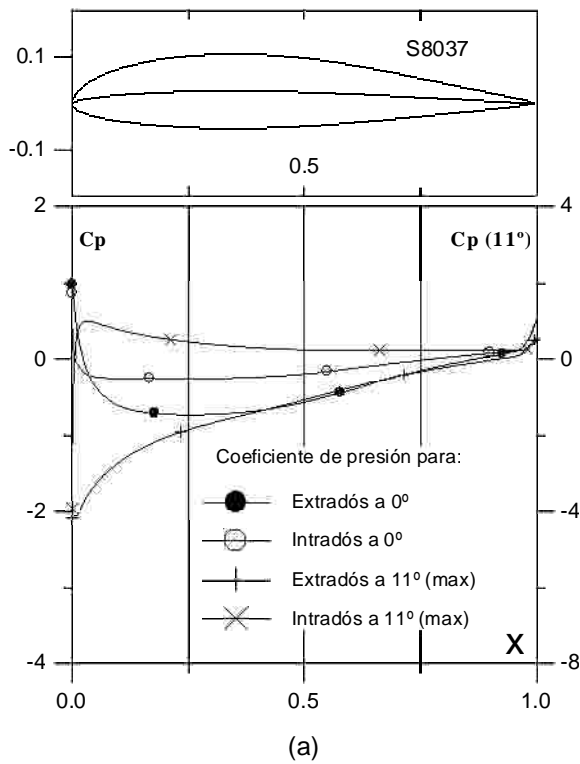


Fig. 4.2.19 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S8037. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.19. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S8037.



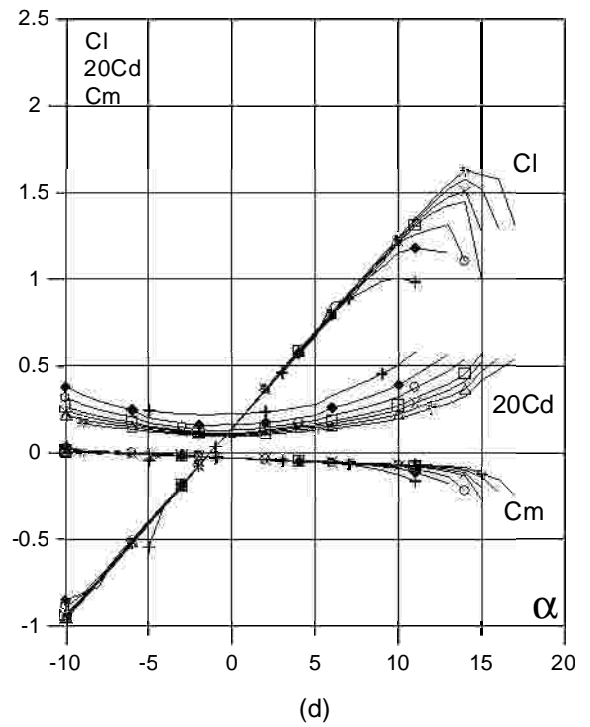
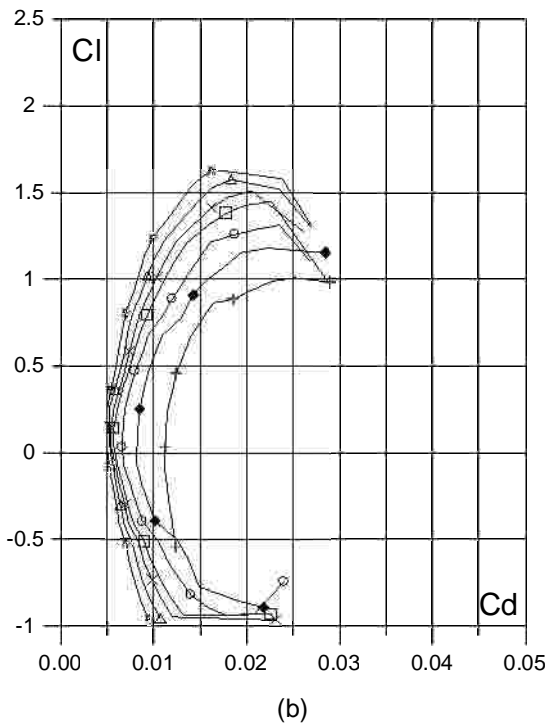
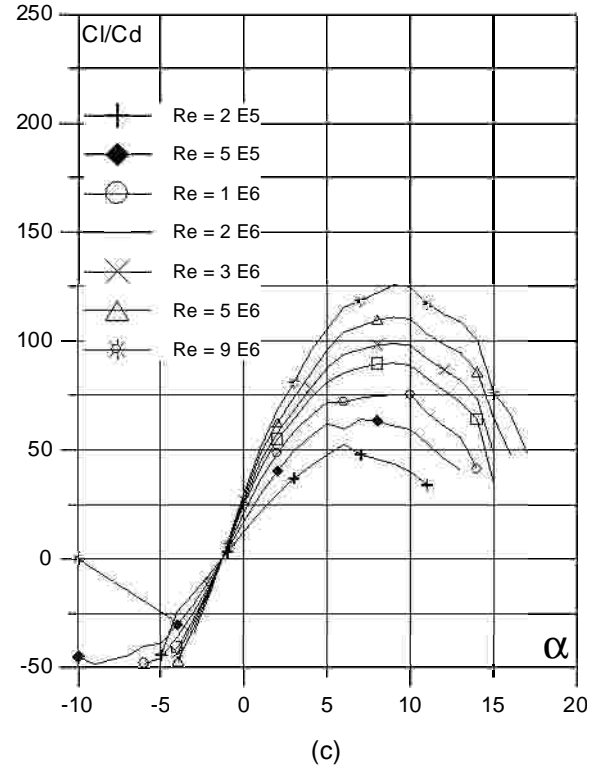
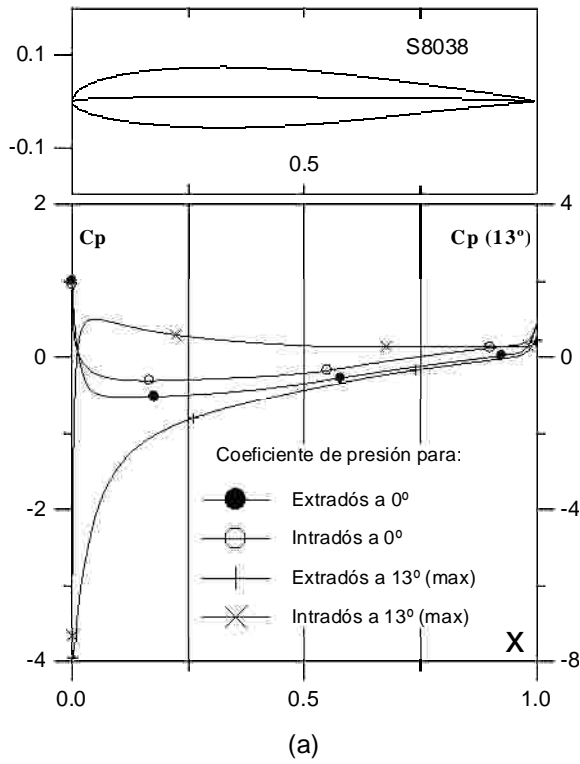


Fig. 4.2.20. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil S8038. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.2.20. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil S8038.

### 4.3 Evaluación Computacional del los Perfiles ZAREA

La codificación de los perfiles SELIG modificados sigue el siguiente formato: ZAREA xxxx, donde xxxx corresponde a la identificación del perfil SELIG original al cual se le modificó el borde de ataque.

Los contornos de los perfiles modificados se presentan en la fig.4.3.1

A continuación se presenta las tablas de las características geométricas de los perfiles modificados, tabla 4.3.1

Las figuras 4.3.2 a 4.3.20 contienen las curvas características de los perfiles SELIG modificados.

Tabla 4.3.1 Características Geométricas de los perfiles de la serie SELIG (ZAREA) modificados

Perfil	E.max (%c)	x- E.max	Fmax(%c)	x-Fmax	Area c.u.
ZAREA 1020	15.06	0.3100	6.41	0.4590	0.1001
ZAREA 4083	8.21	0.2420	5.91	0.2590	0.0506
ZAREA 7012	8.87	0.2680	5.28	0.2330	0.0579
ZAREA 7055	10.55	0.2870	6.58	0.2640	0.0725
ZAREA 2046	9.20	0.2650	4,04	0.2760	0.0582
ZAREA 2050	9.05	0,2720	3,12	0.2370	0.0589
ZAREA 2060	8.01	0,2830	4.82	0.2400	0.0548
ZAREA 2062	8.10	0.2700	4.06	0.2490	0.0550
ZAREA 2091	10.16	0.2580	6.23	0.2820	0.0647
ZAREA 3002	10.08	0.2750	4.81	0.2650	0.0662
ZAREA 3010	10.48	0.2620	6.67	0.2390	0.0656
ZAREA 3014	9.58	0.2720	4.99	0.2510	0.0635
ZAREA 3025	9.43	0.2810	5.90	0.2860	0.0637
ZAREA 4022	12.42	0.3010	6.75	0.3020	0.0829
ZAREA 4061	9.75	0.2660	6.66	0.3150	0.0639
ZAREA 4062	9.61	0.2800	5.59	0.4020	0.0645
ZAREA 8025	8.11	0.2370	3.27	0.1860	0.0489
ZAREA 8037	15.96	0.3430	5.82	0.2260	0.1074
ZAREA 8038	8.11	0.2960	3.62	0.1910	0.0878

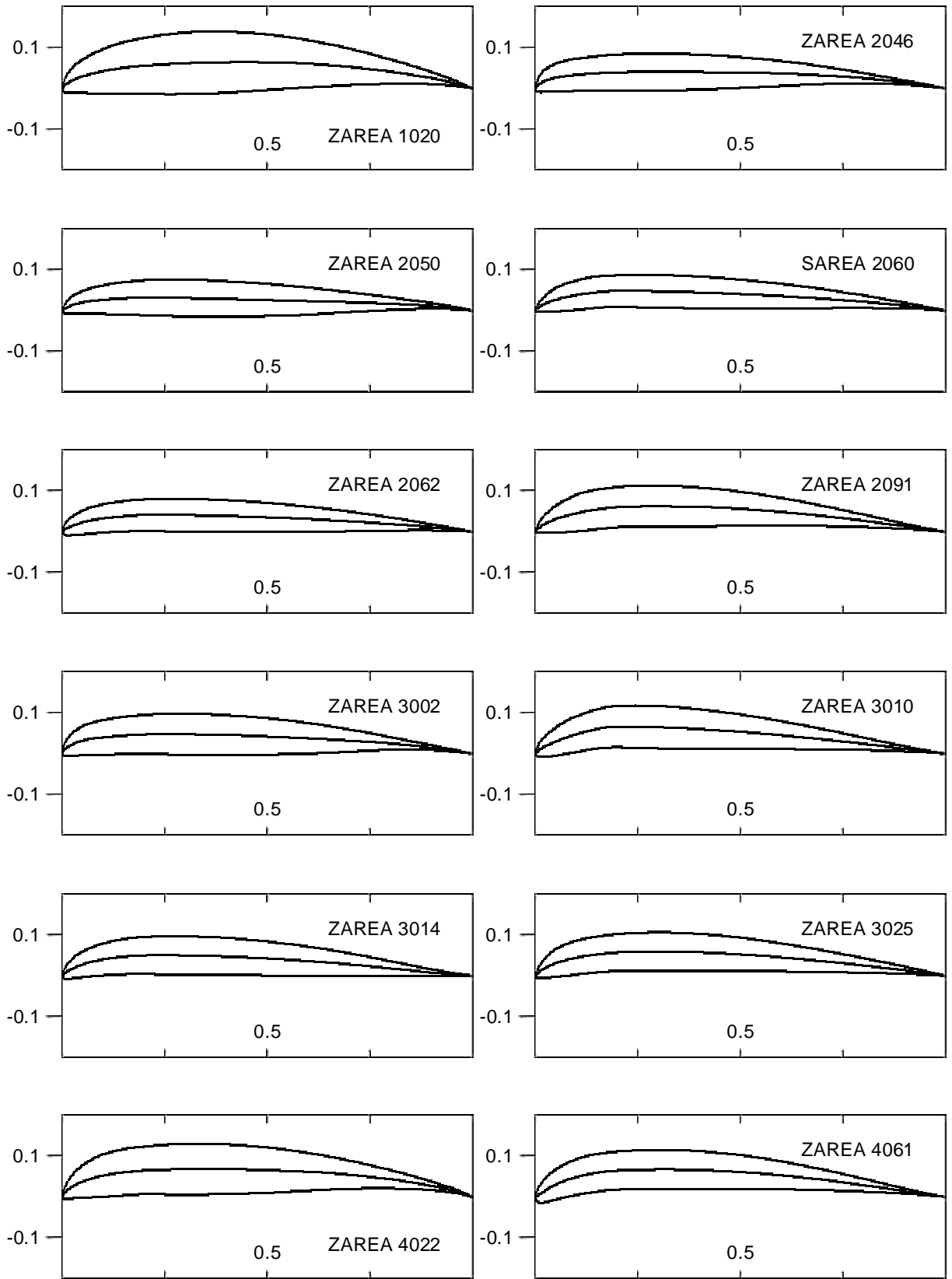


Fig. 4.3.1 Contornos de los perfiles ZAREA

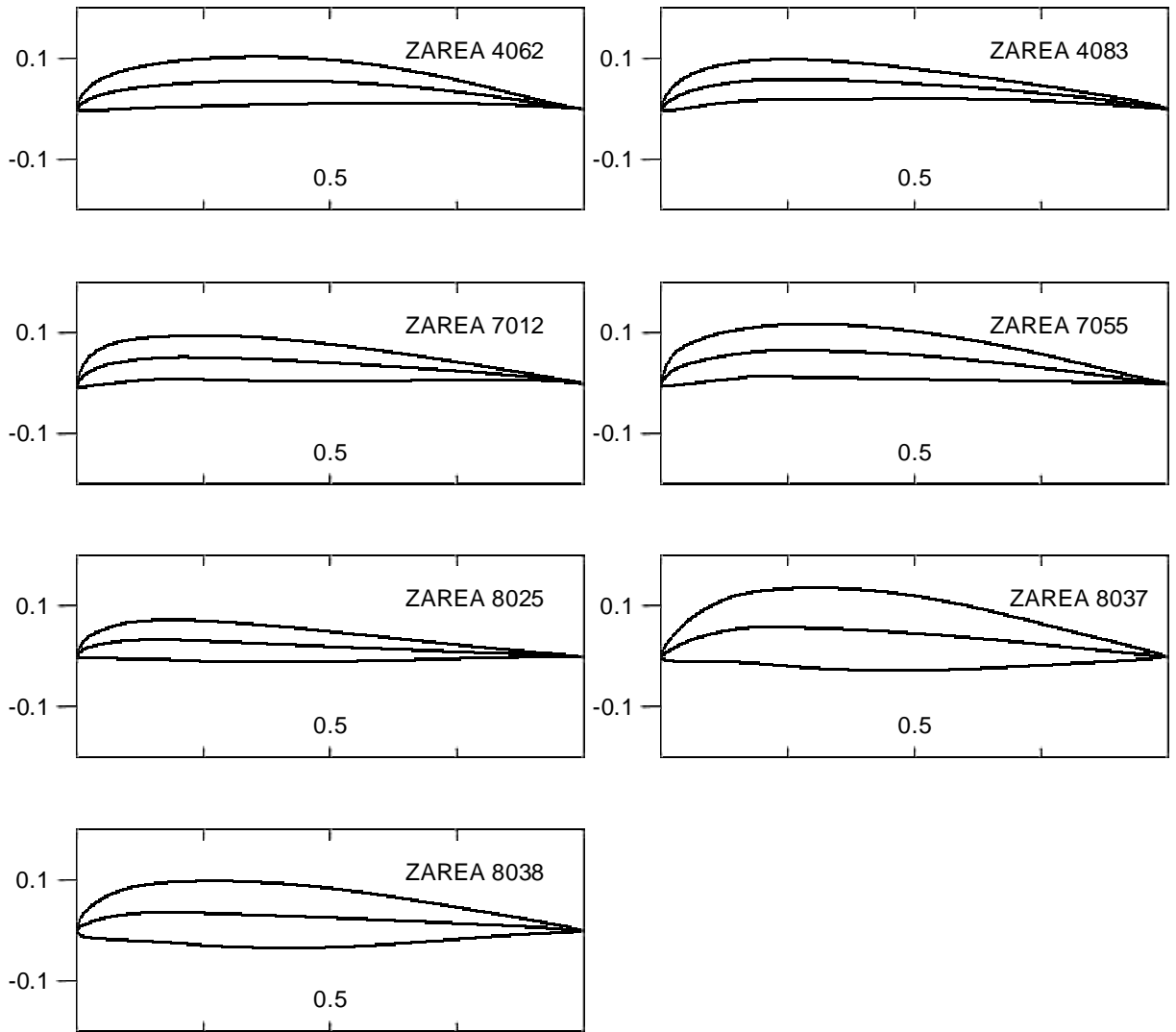


Fig. 4.3.1 Contornos de los perfiles ZAREA (continuación)

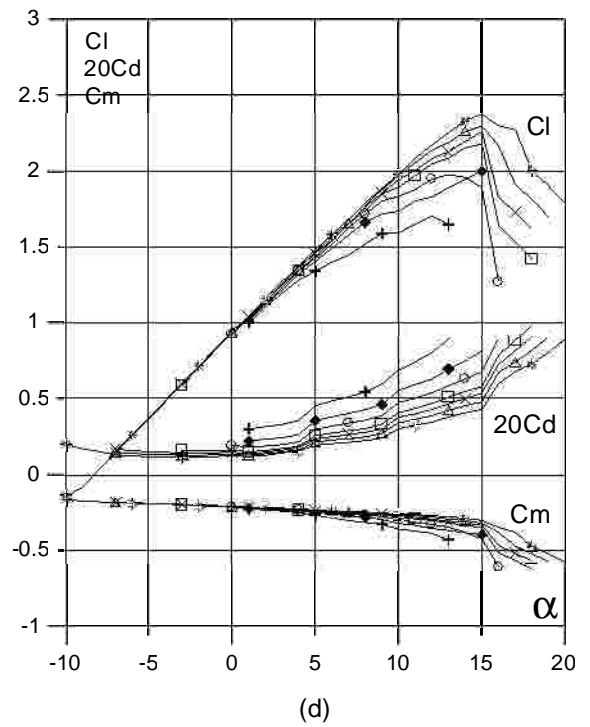
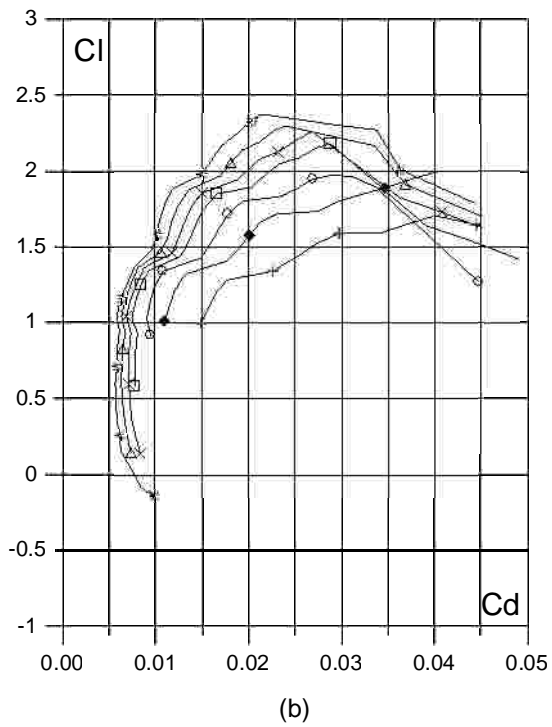
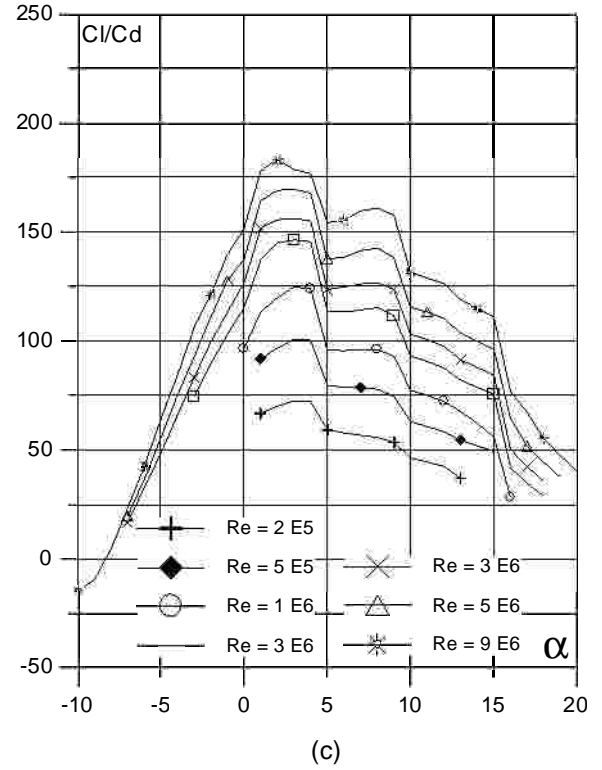
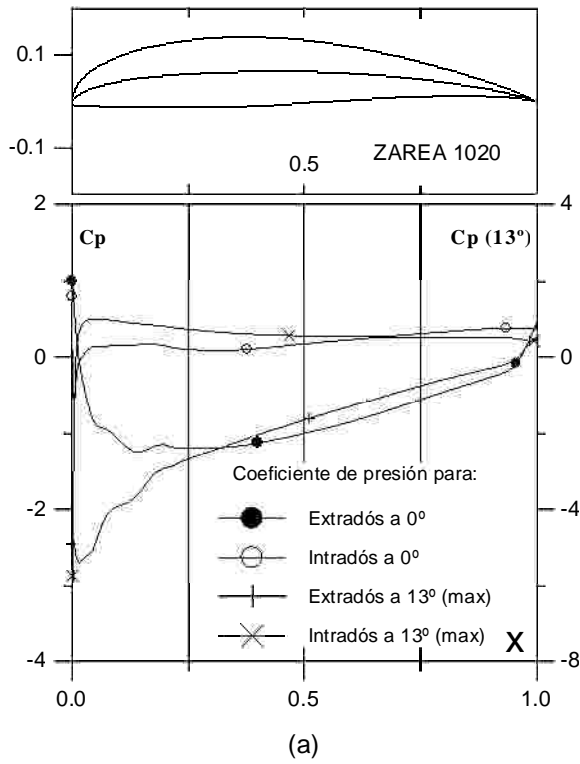


Fig. 4.3.2. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 1020. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.2. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 1020.

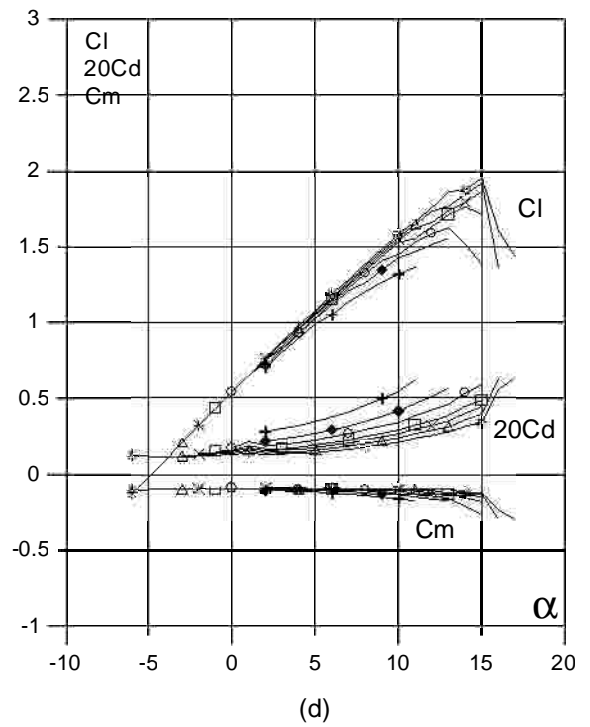
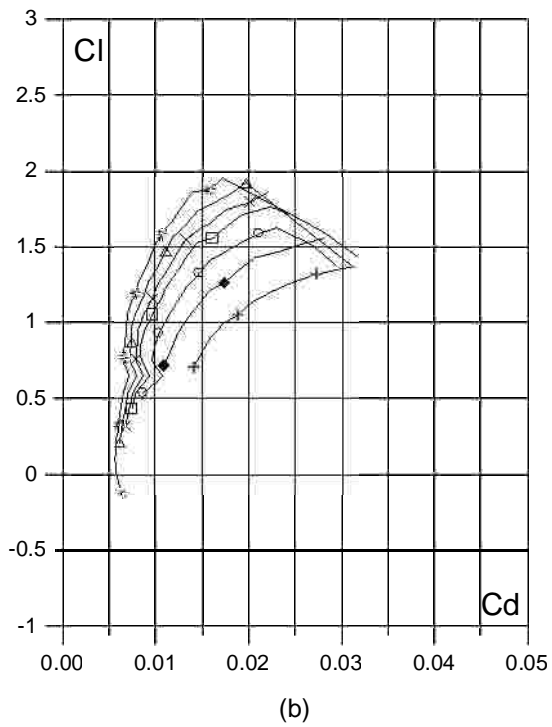
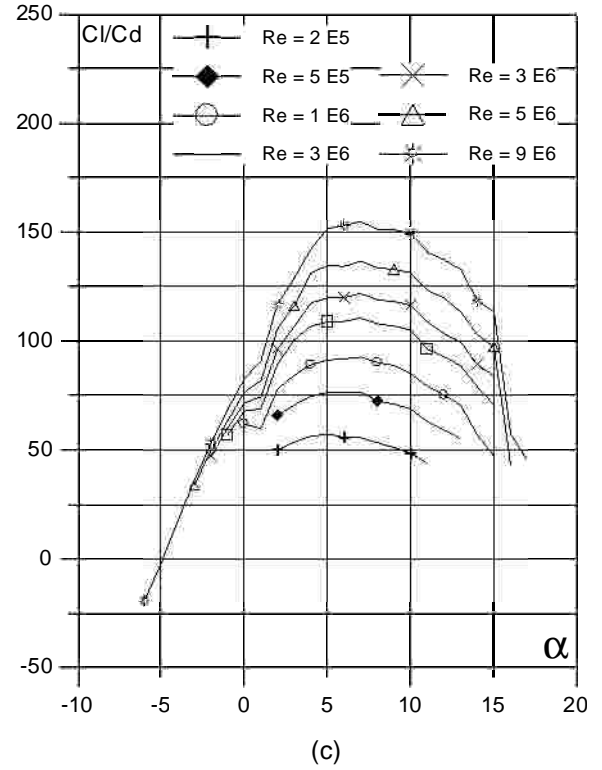
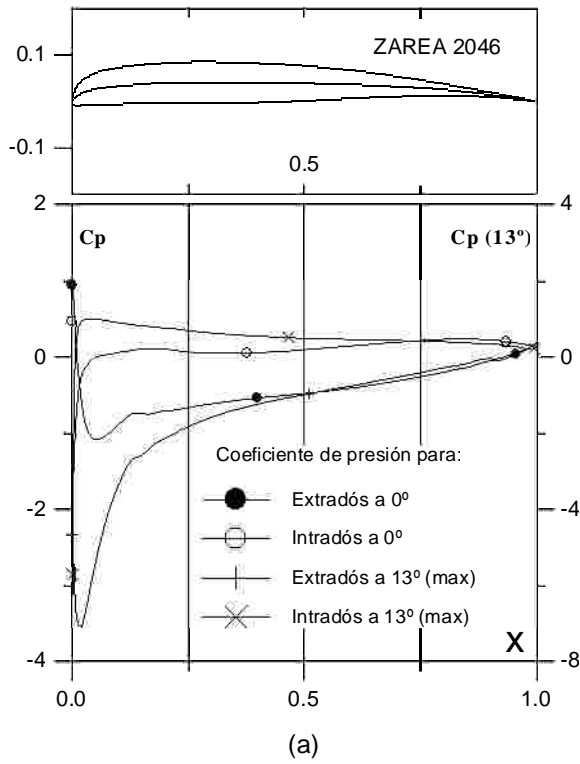


Fig. 4.3.3 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2046. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.3 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2046.

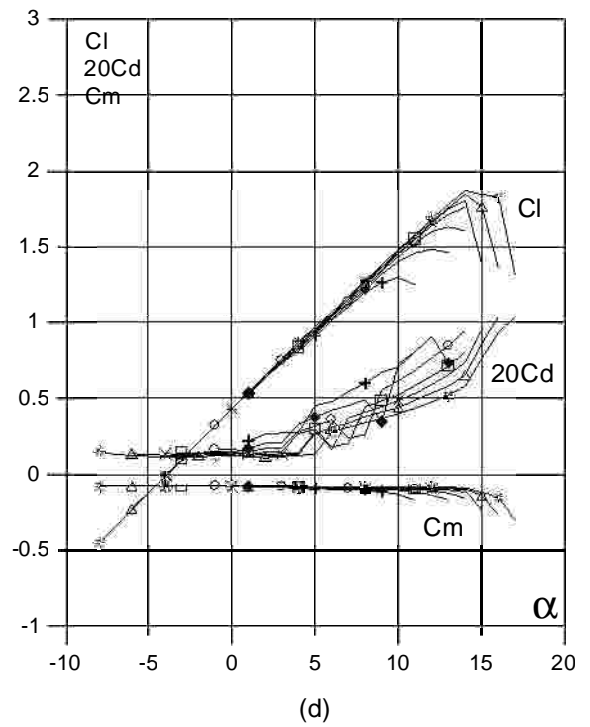
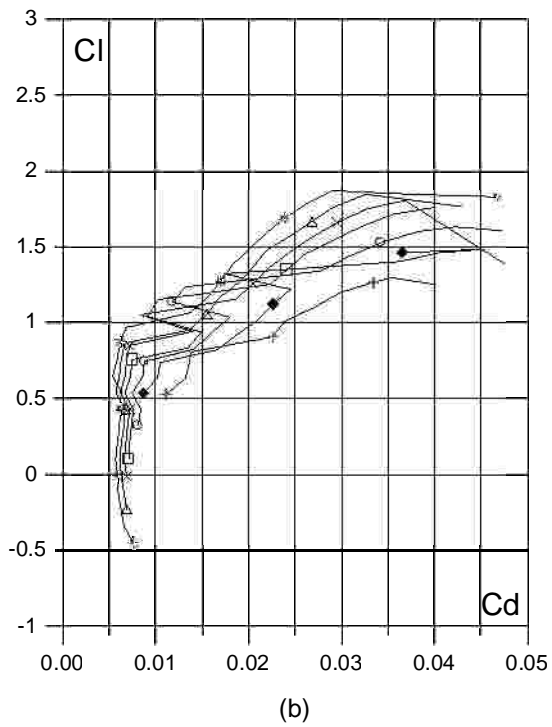
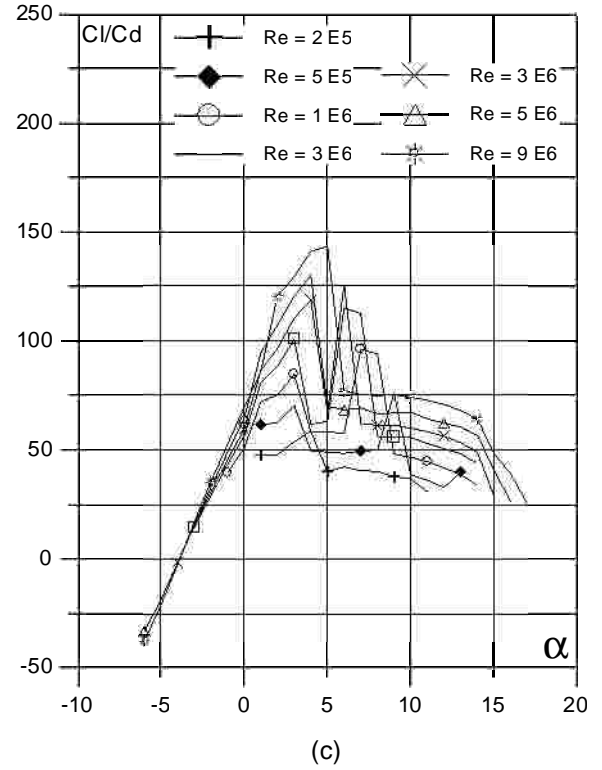
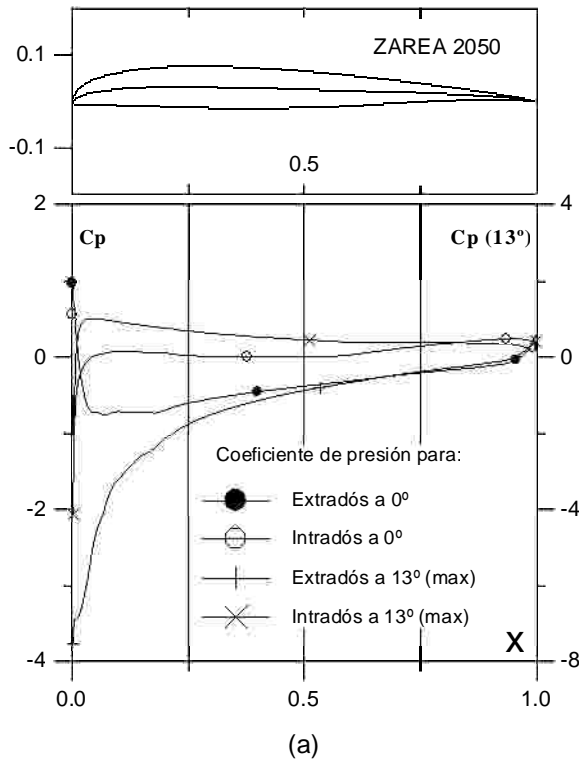


Fig. 4.3.4. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2050. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.4. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2050.

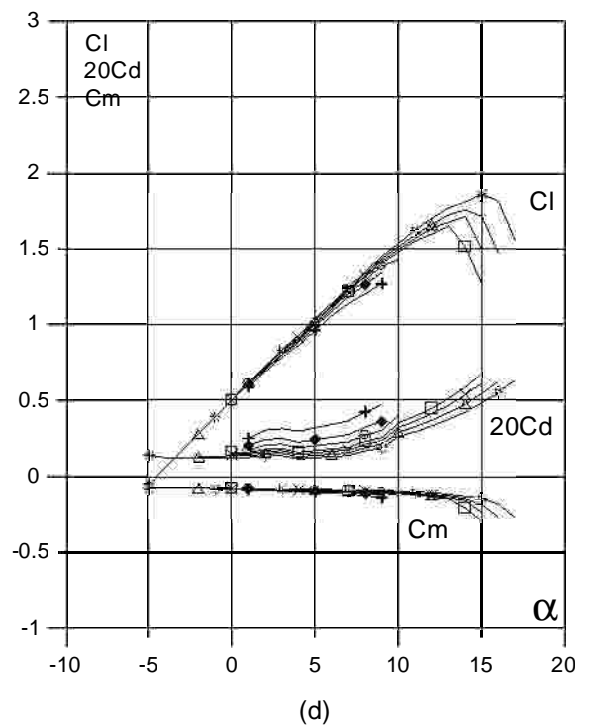
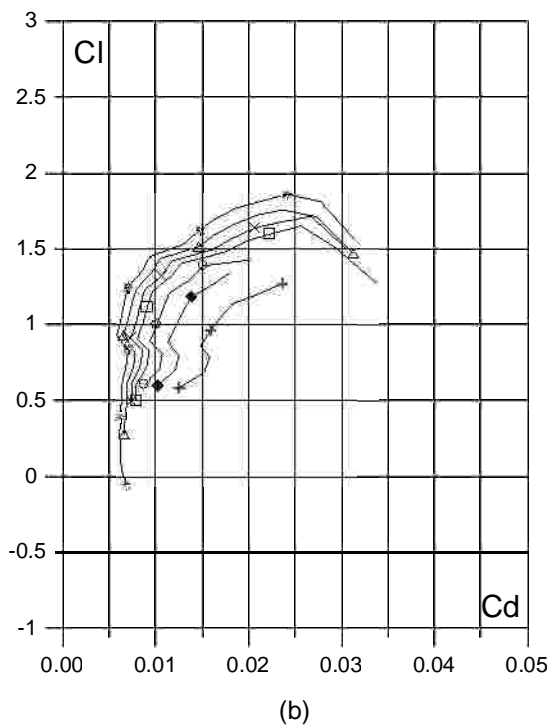
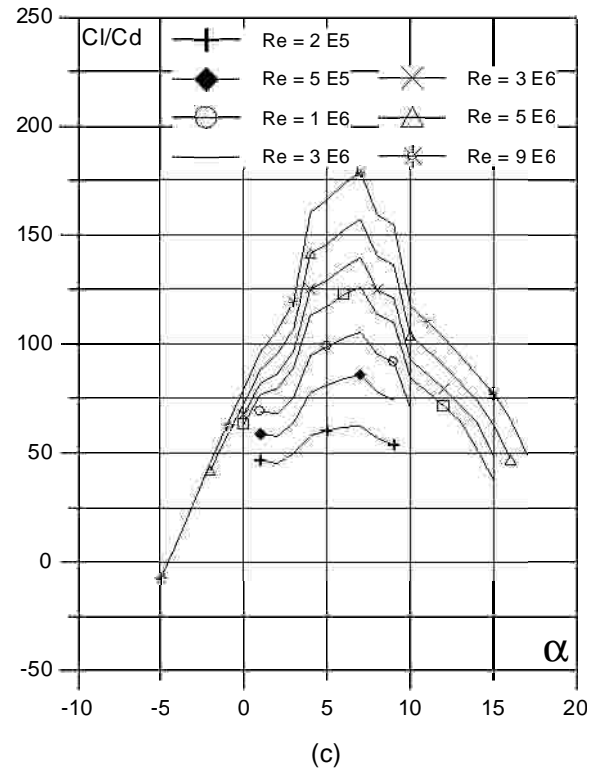
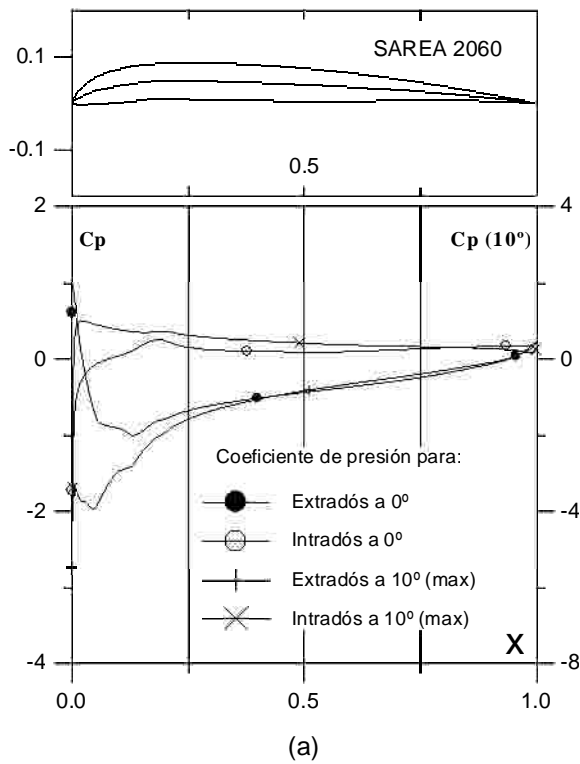


Fig. 4.3.5. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2060. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.5 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2060.



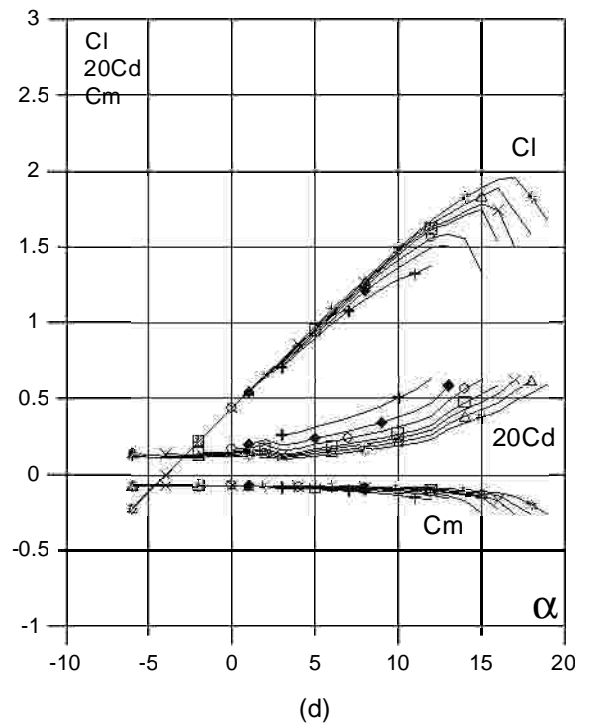
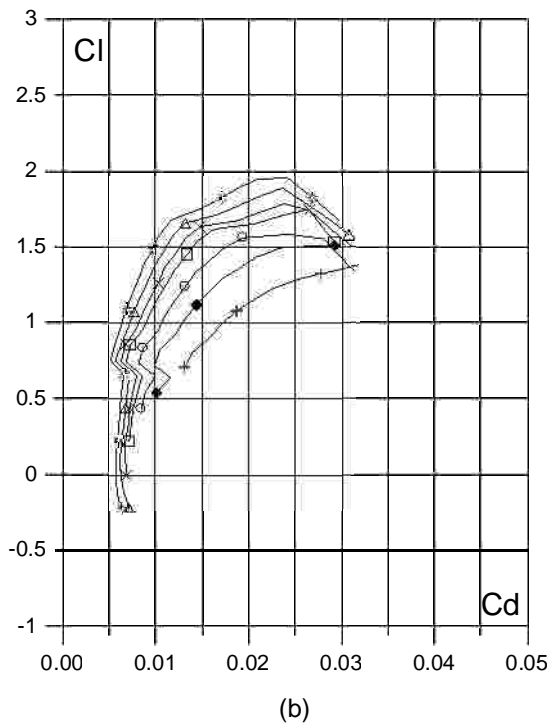
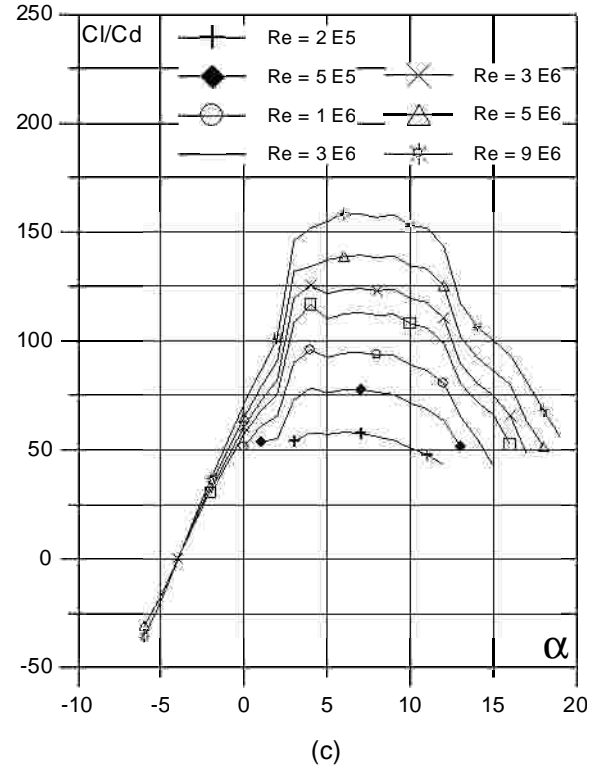
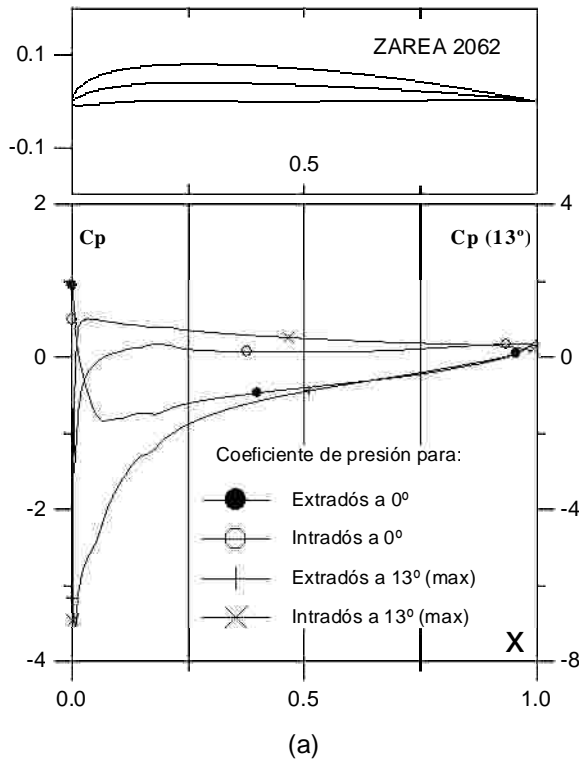


Fig. 4.3.6. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2062. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.6. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2062.

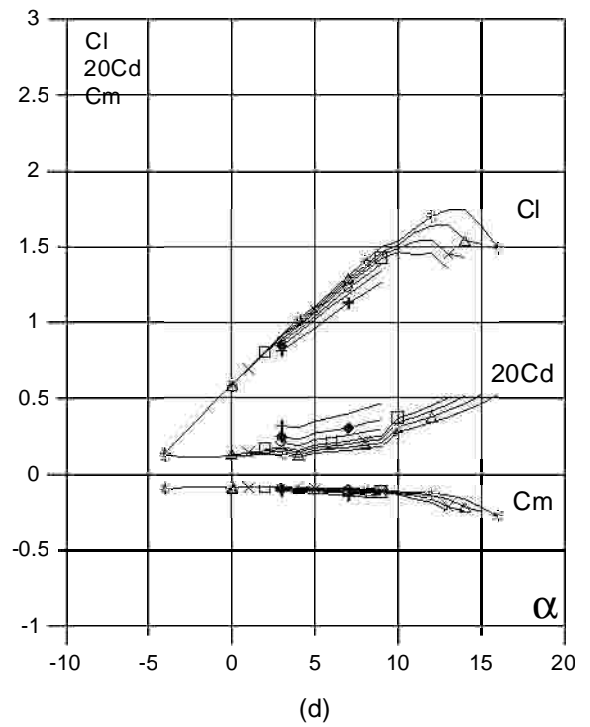
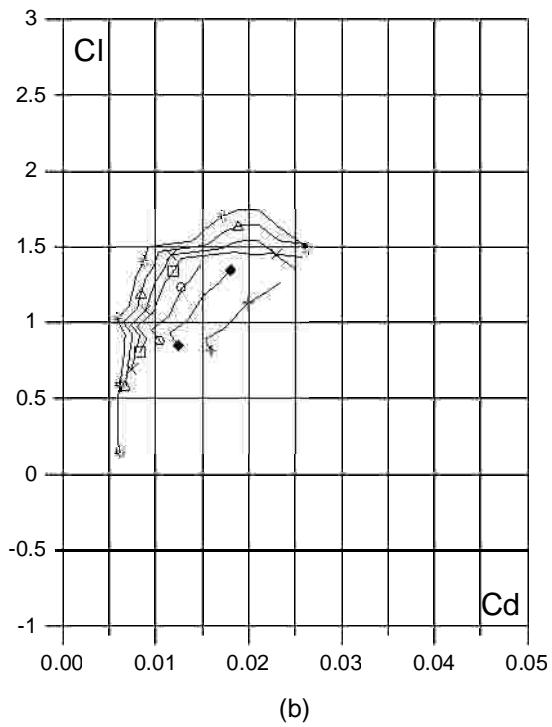
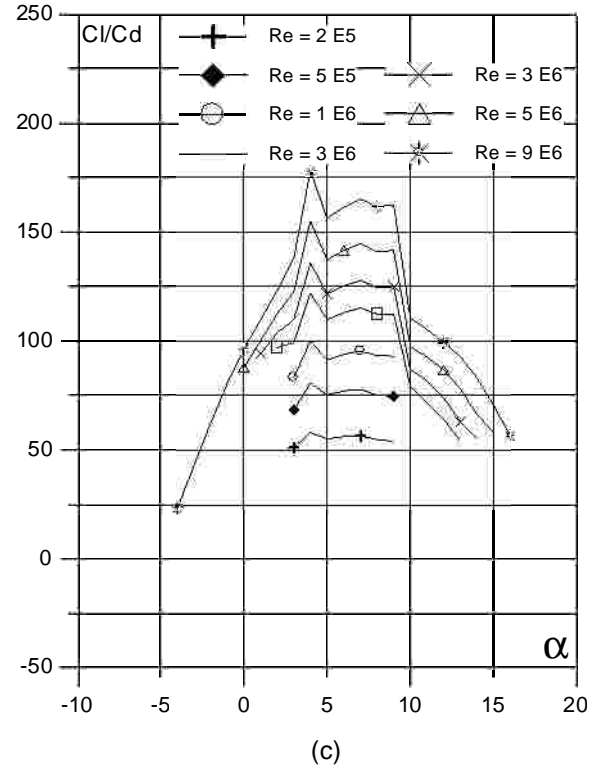
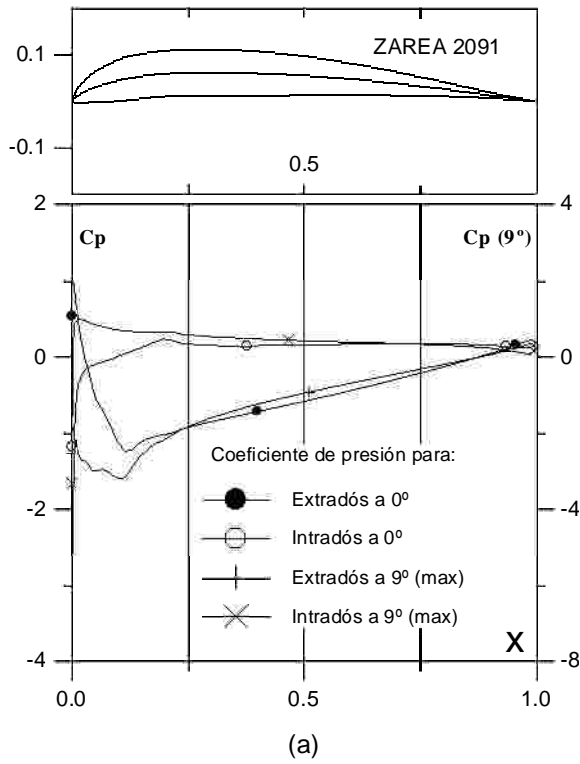


Fig. 4.3.7 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2091. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.7. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2091.

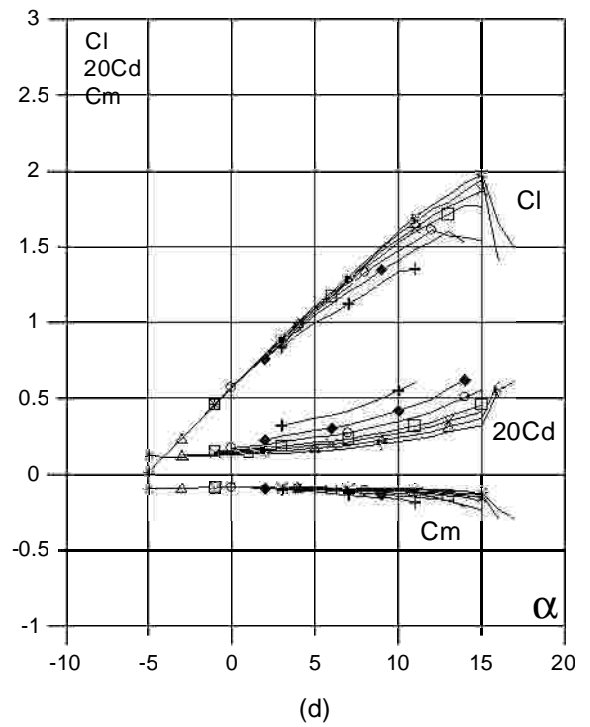
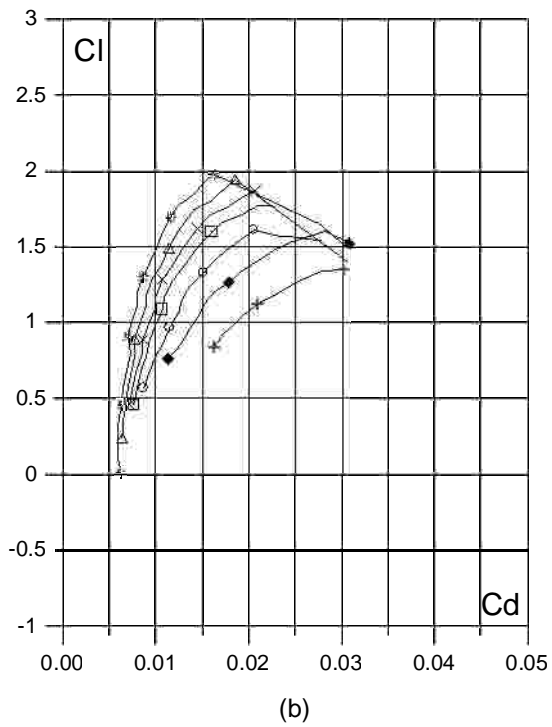
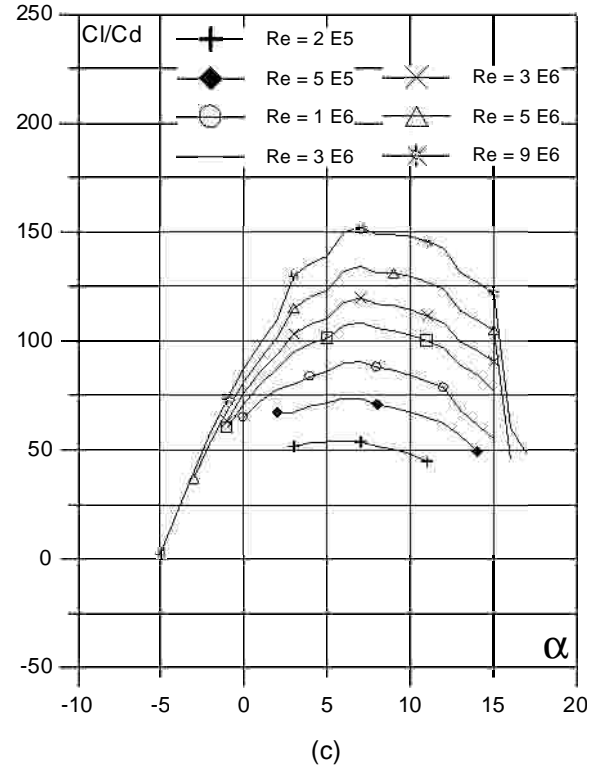
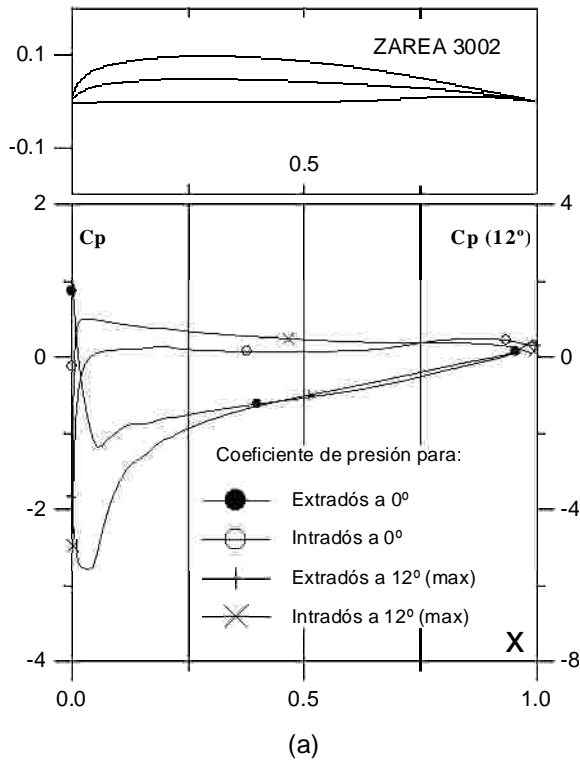


Fig. 4.3.8 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 3002. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.8 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 3002.

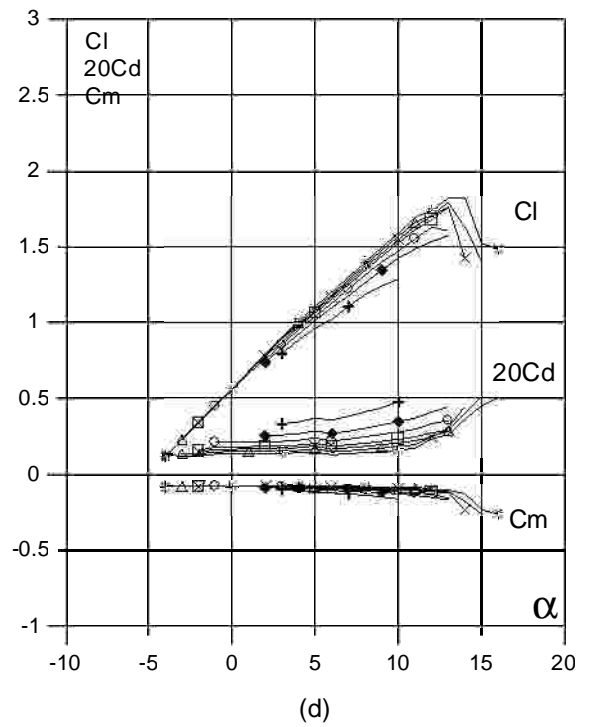
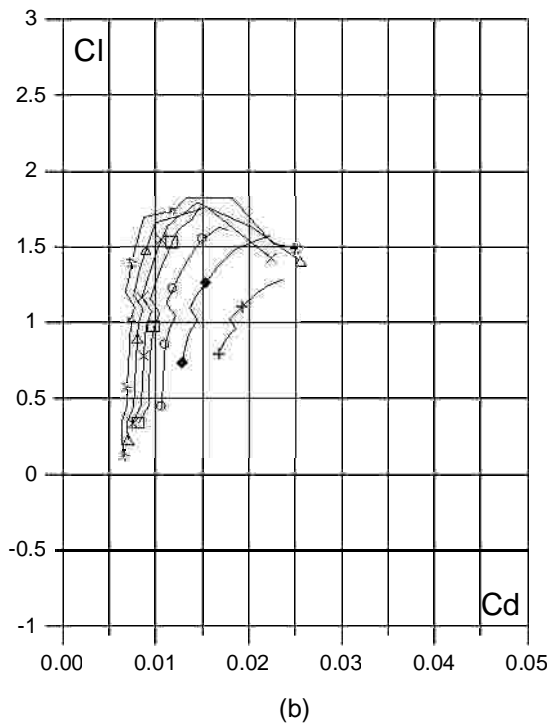
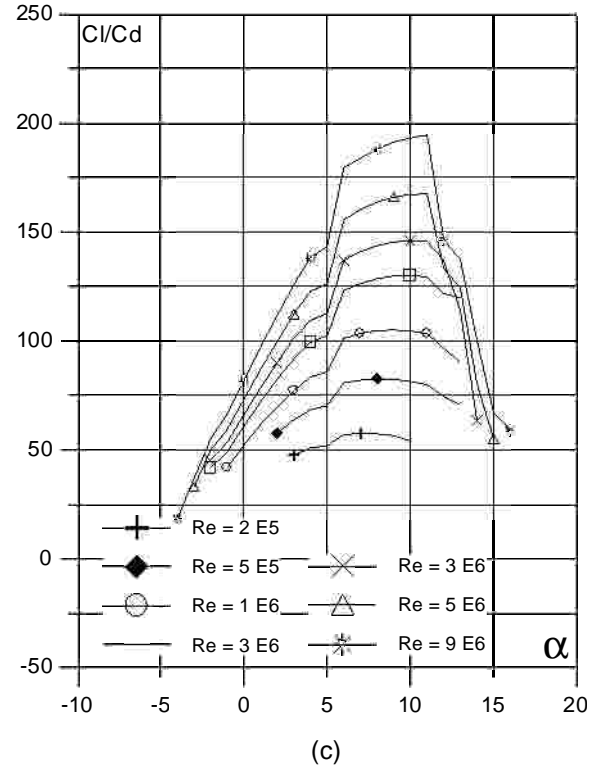
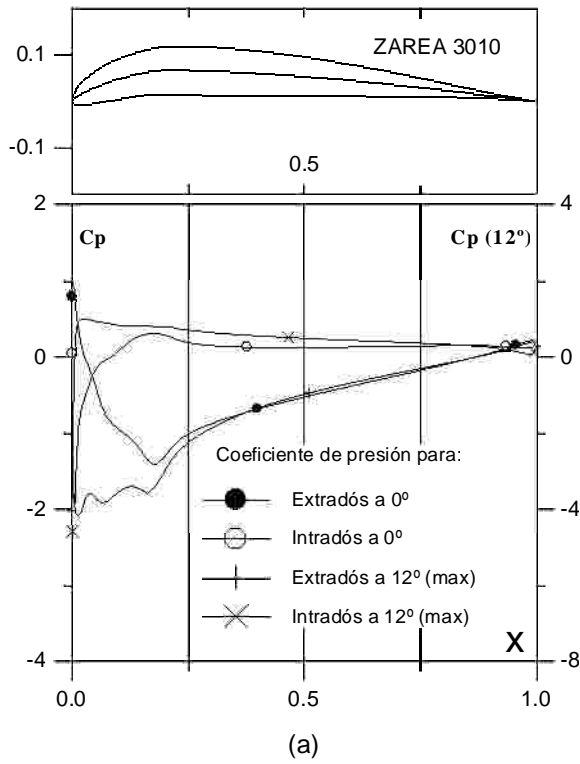


Fig. 4.3.9. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 3010. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.9. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 3010.

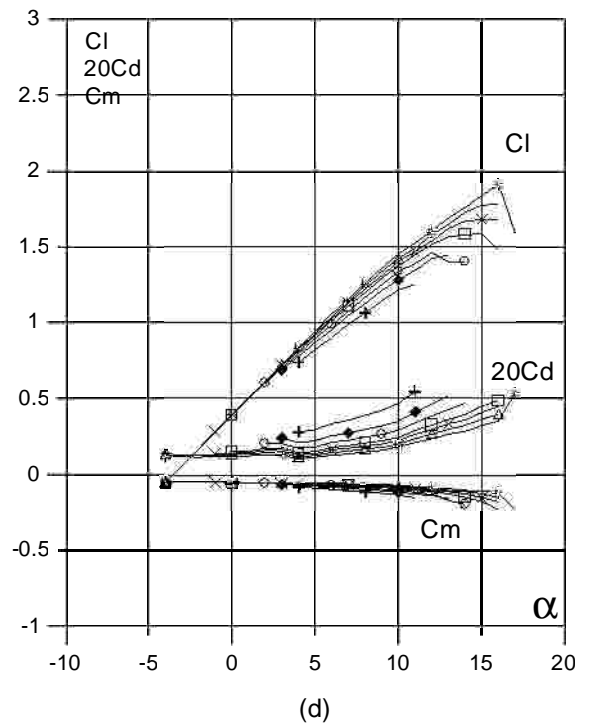
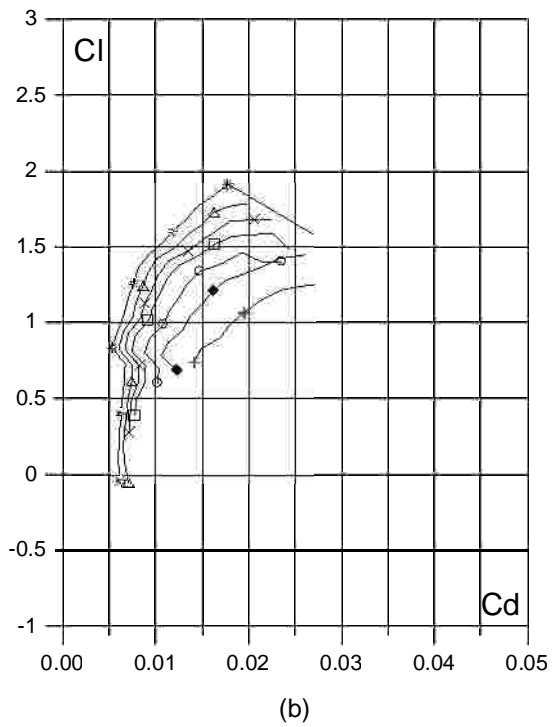
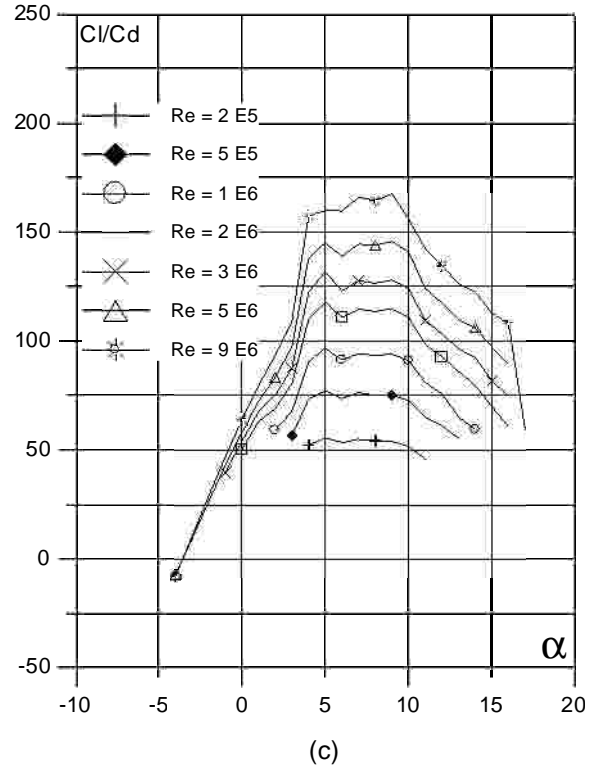
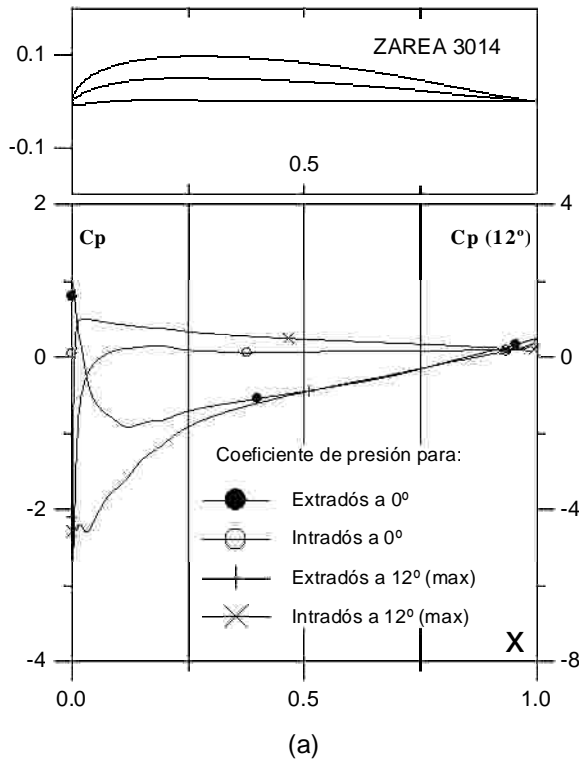


Fig. 4.3.10. (a)  $C_p$  ( $0^\circ \alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 3014. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.10. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 3014.

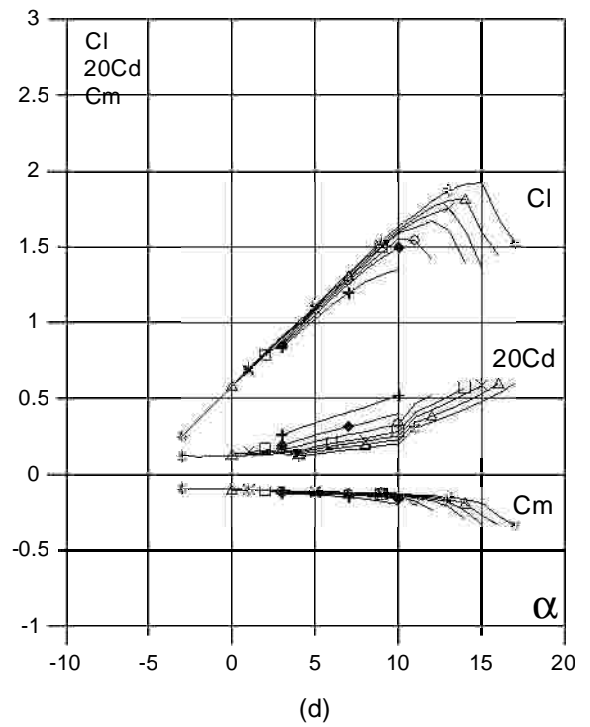
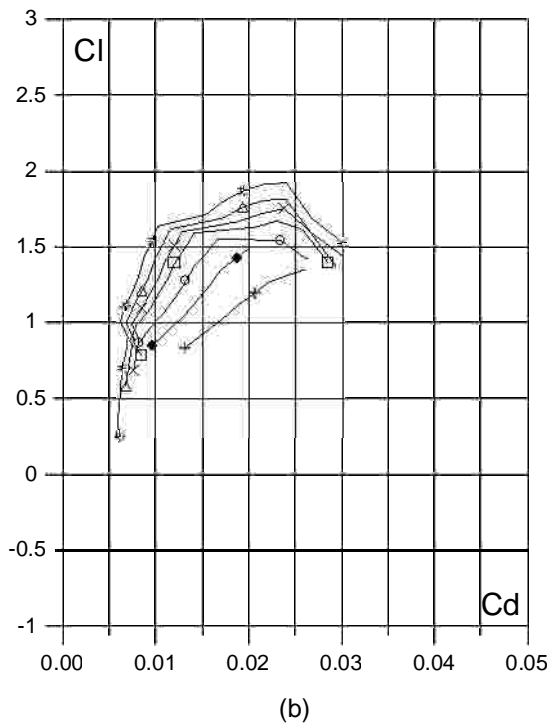
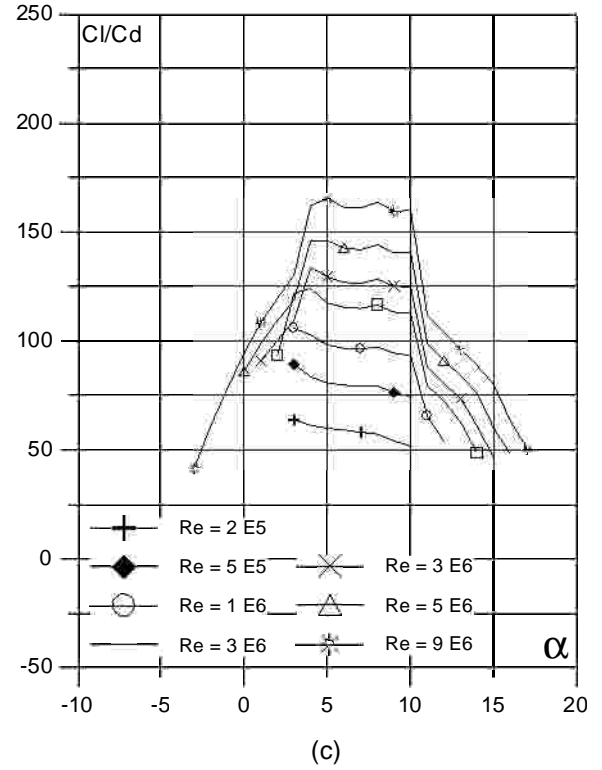
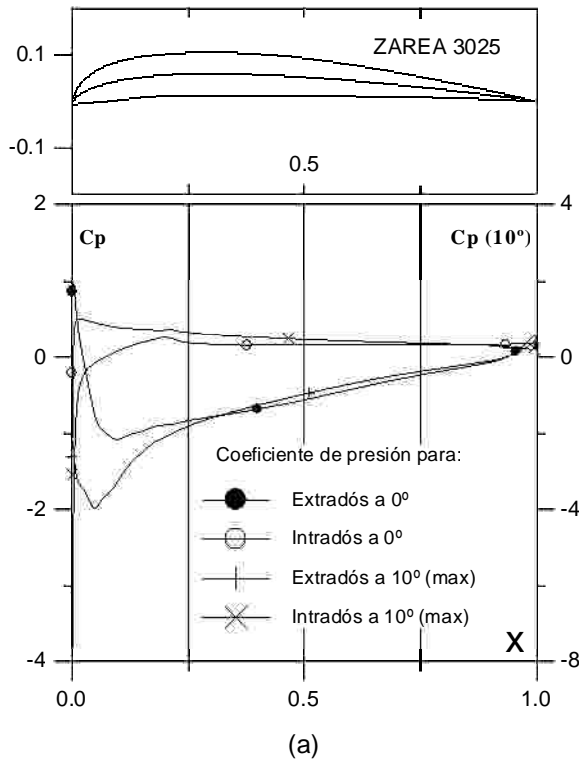


Fig. 4.3.11 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $10^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 3025. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.11. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 3025.

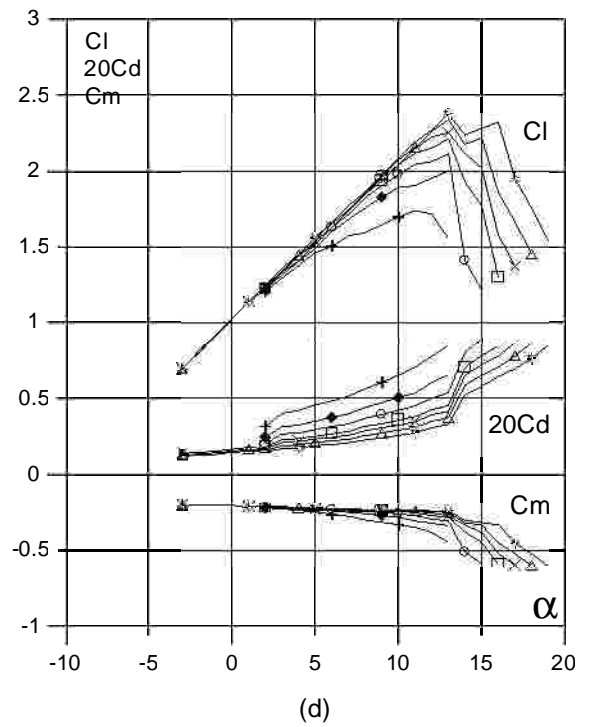
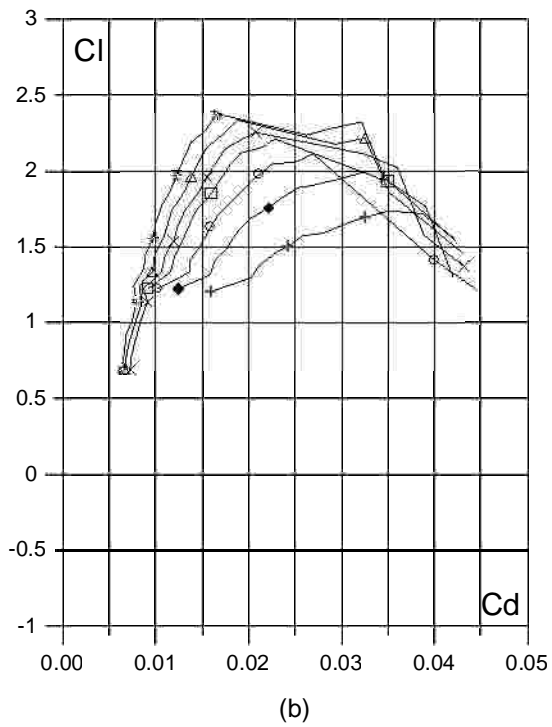
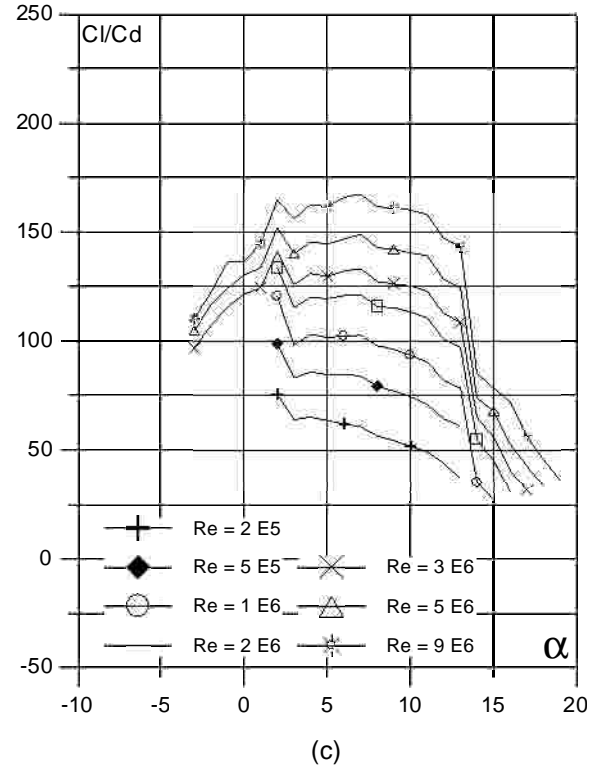
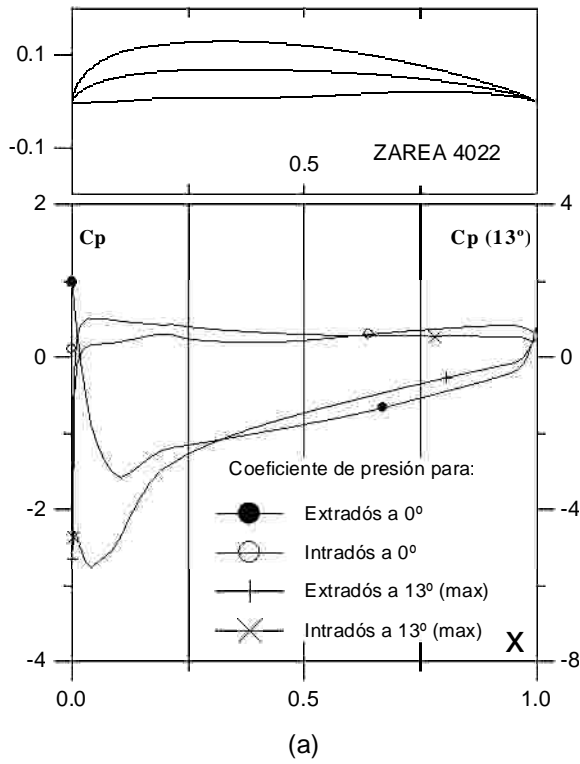


Fig. 4.3.12 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $13^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 4022. Met. Panel y Capa Limite. 100 Puntos.

Fig. 4.3.12. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 4022.

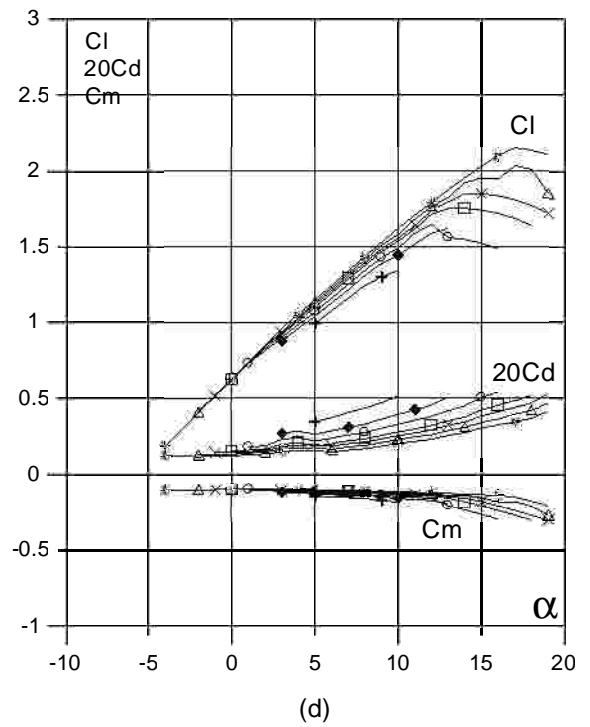
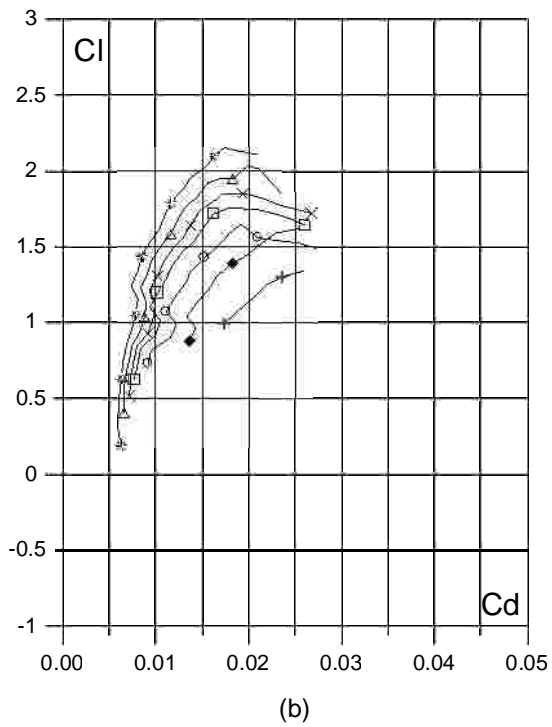
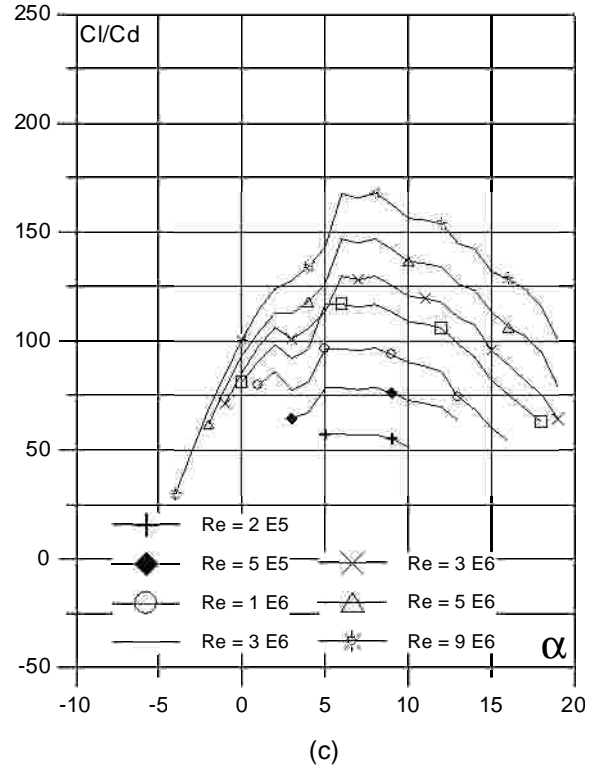
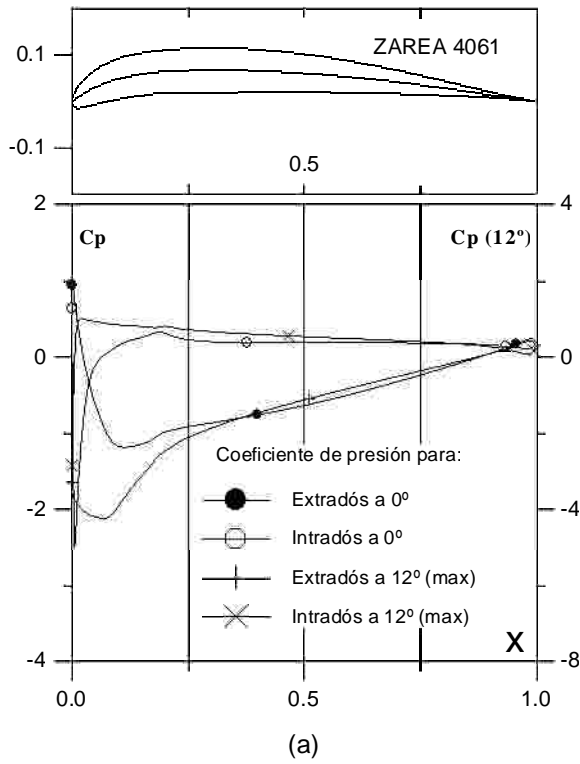
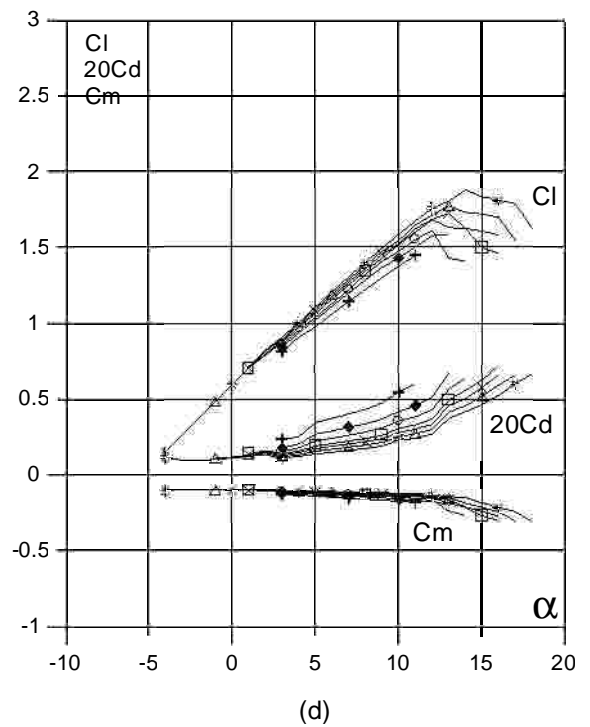
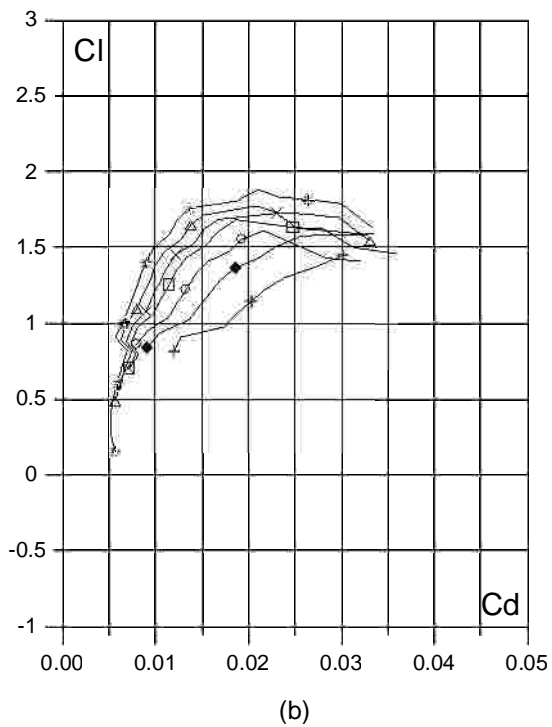
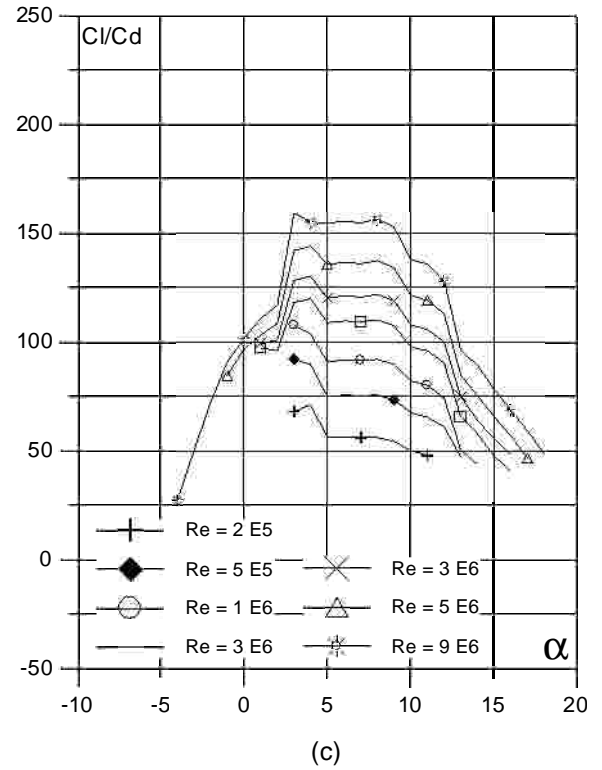
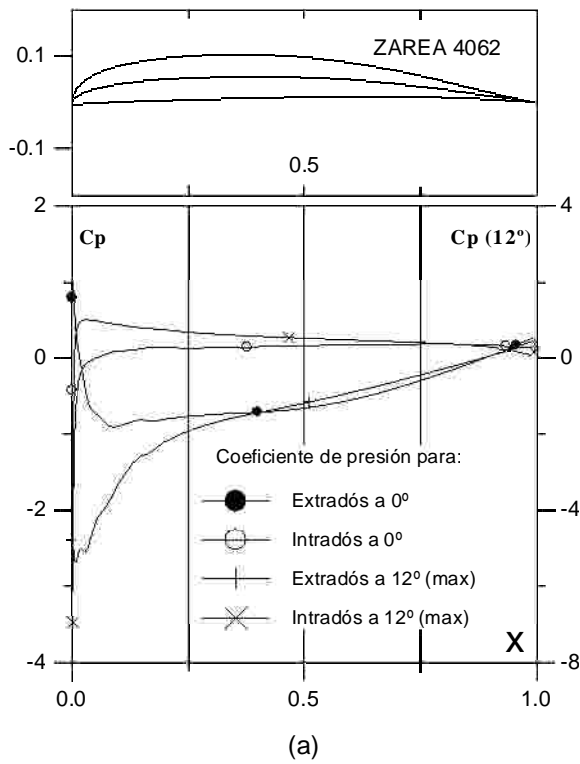


Fig. 4.3.13. (a)  $C_p$  ( $0^\circ \alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 4061. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

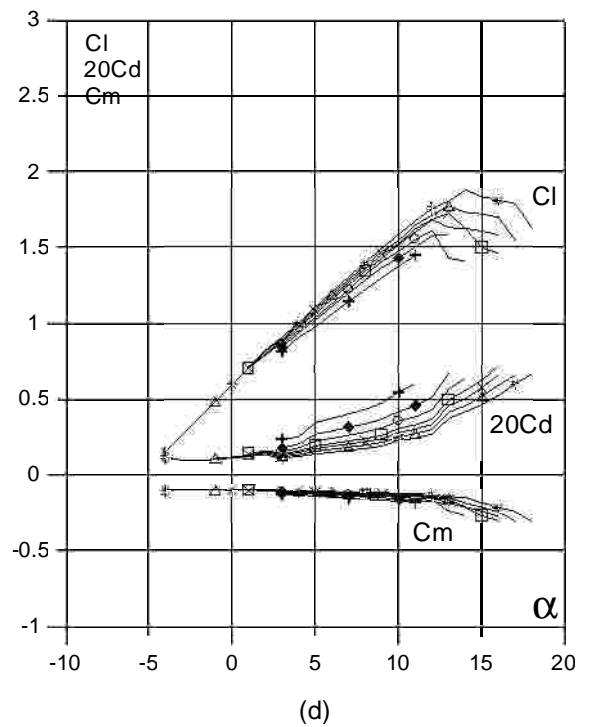
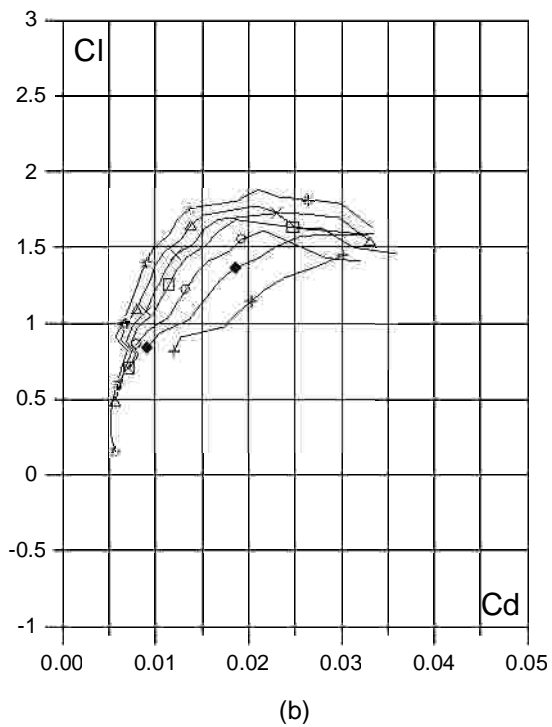
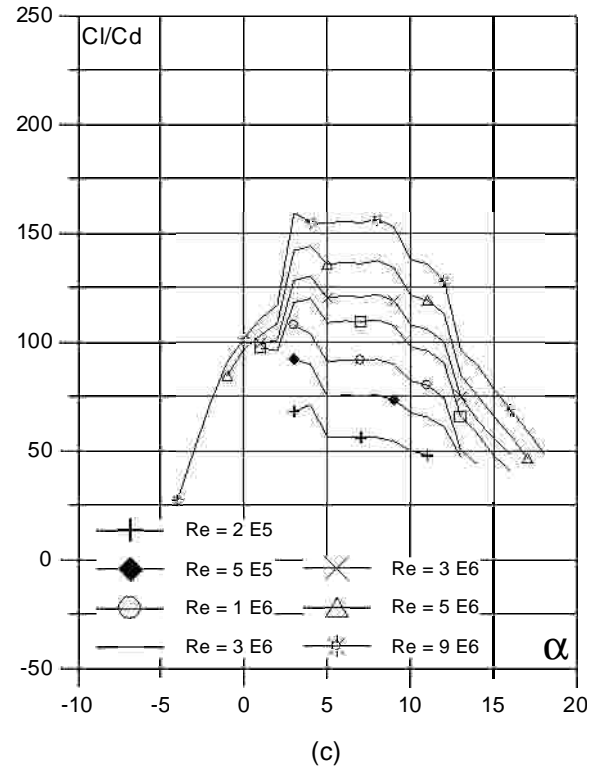
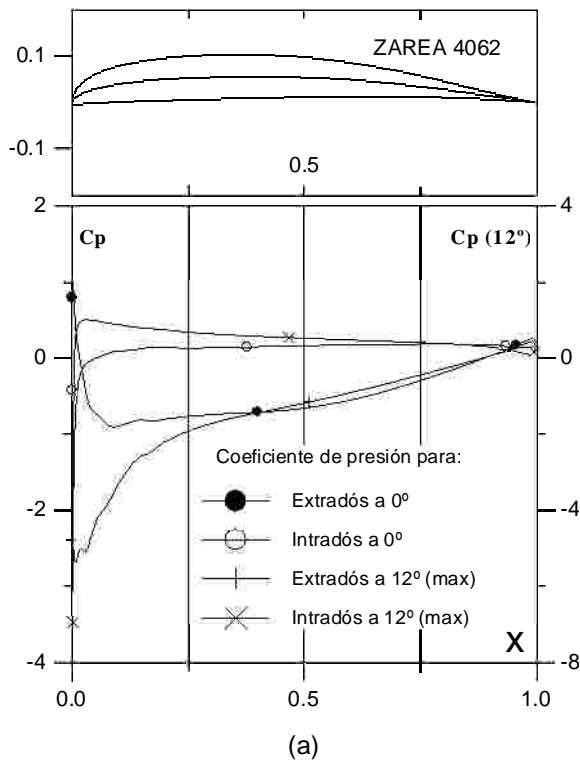
Fig. 4.3.13. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 4061.





4.3.14. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $12^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{lmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 4062. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.14. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 4062.



4.3.14. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $12^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{lmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 4062. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.14. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 4062.

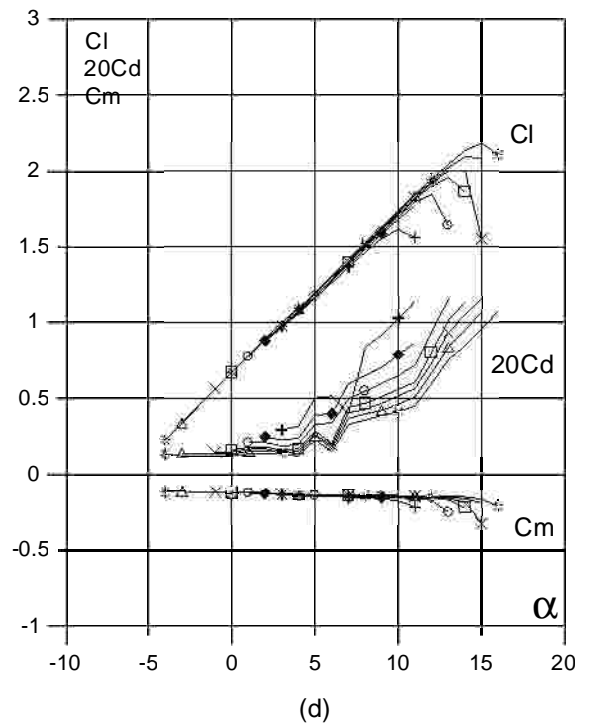
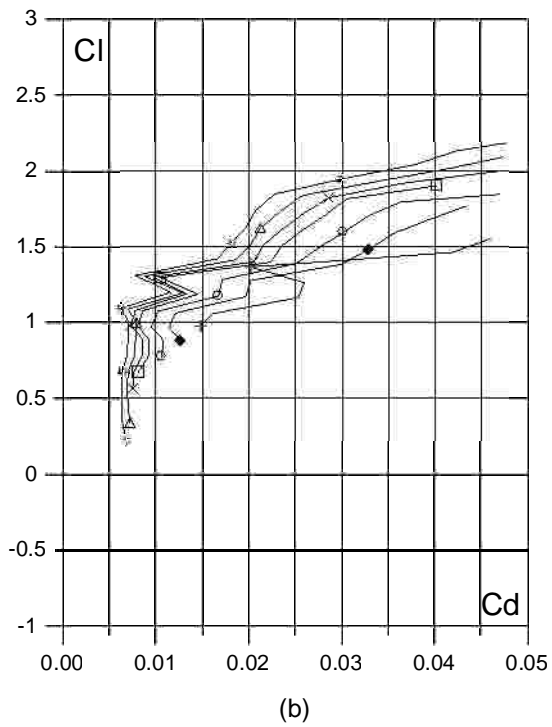
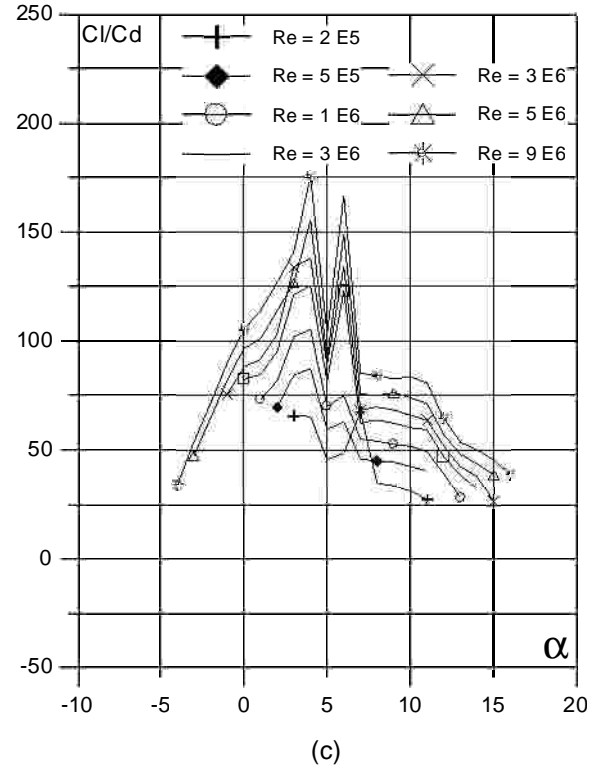
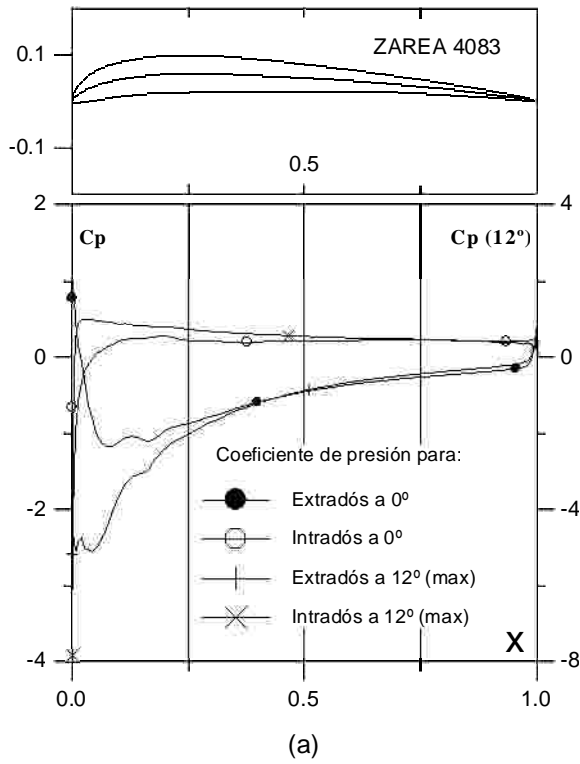


Fig. 4.3.15 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $12^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 4083. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.15 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 4083.

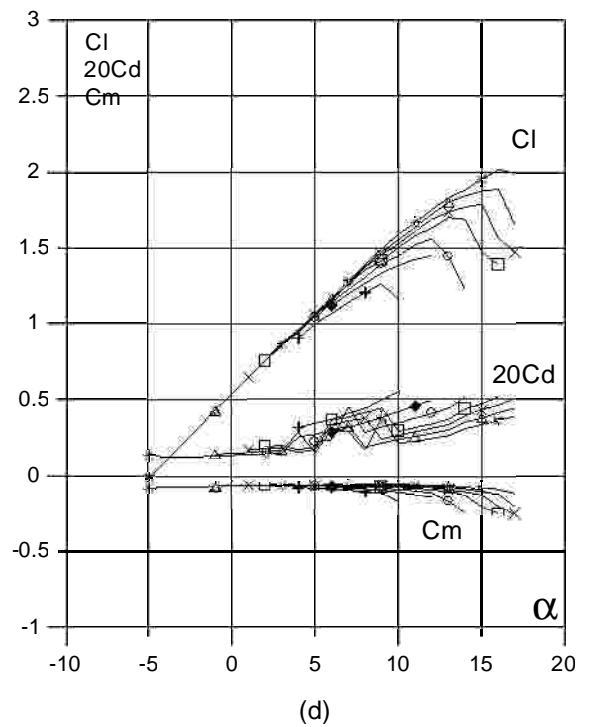
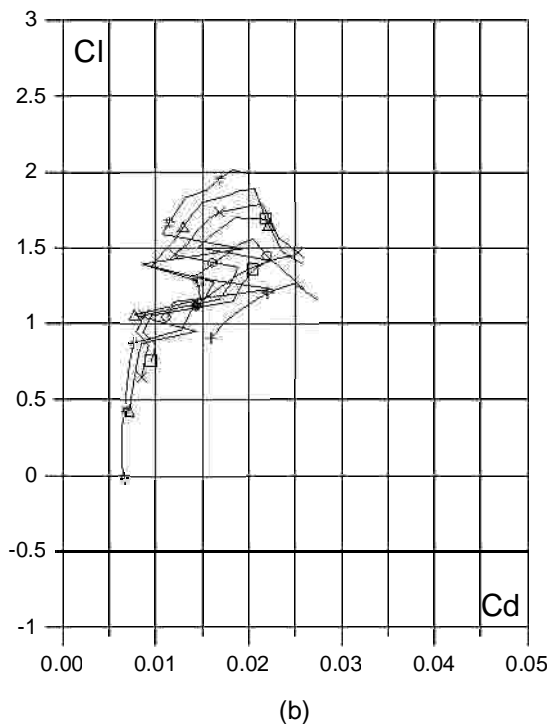
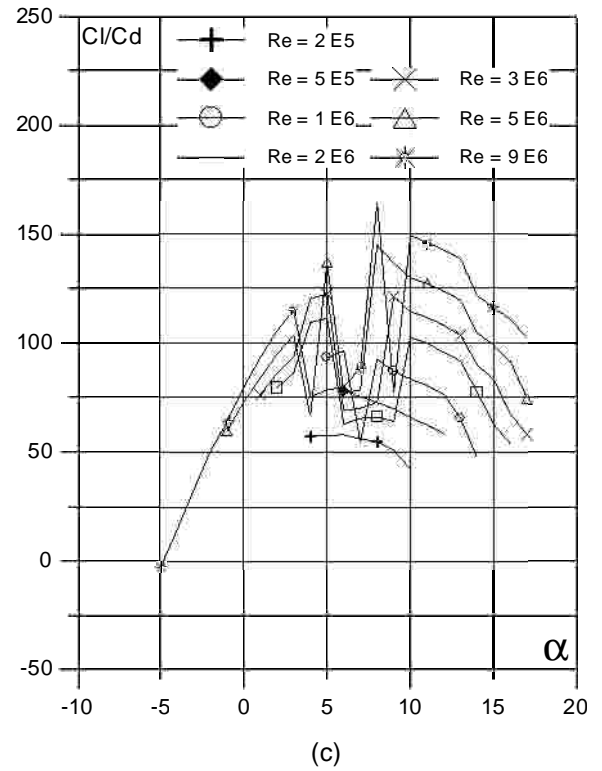
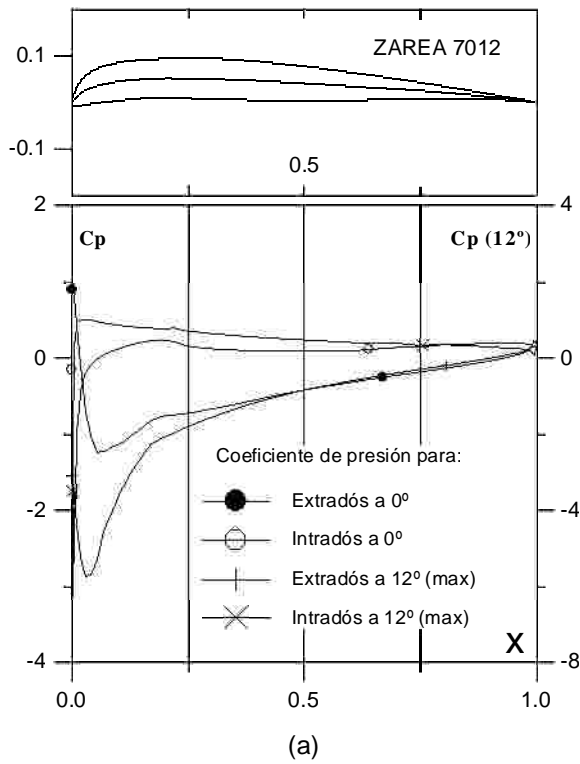


Fig. 4.3.16. (a)  $C_p$  ( $0^\circ \alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 7012. Met. Panel y Capa Límite. 100 Puntos.

Fig. 4.3.16. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 7012.

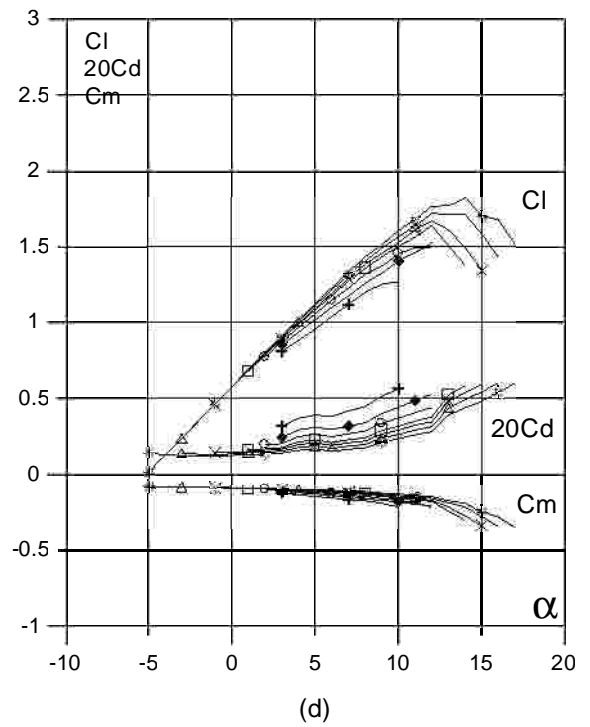
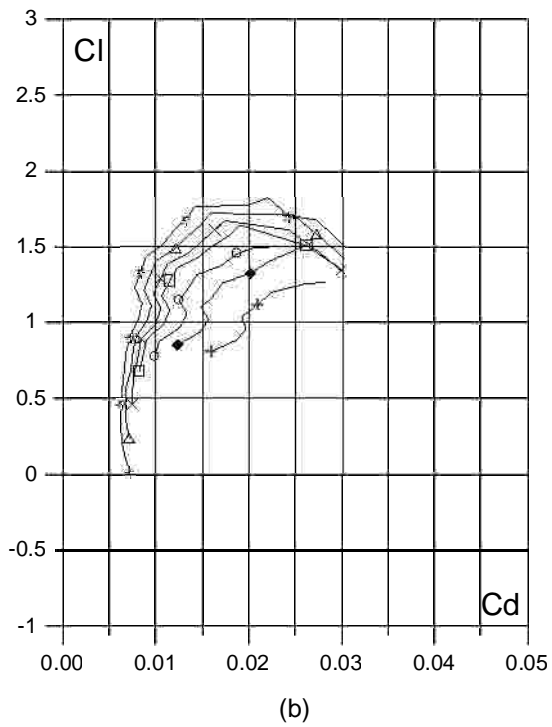
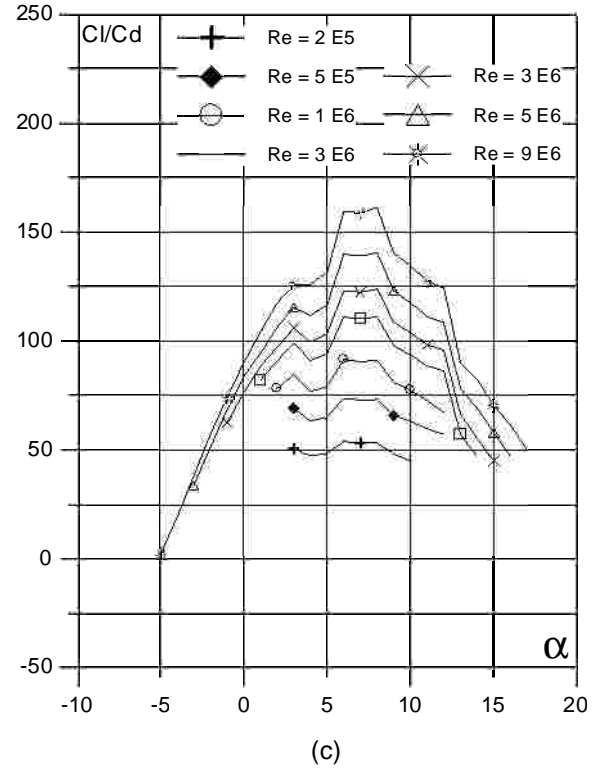
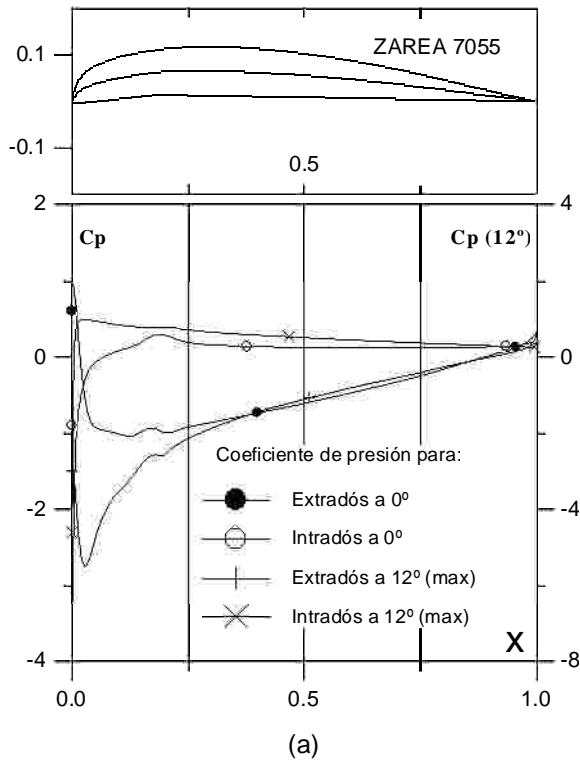


Fig. 4.3.17. (a)  $C_p$  ( $0^\circ \alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 7055. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.17. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 7055.

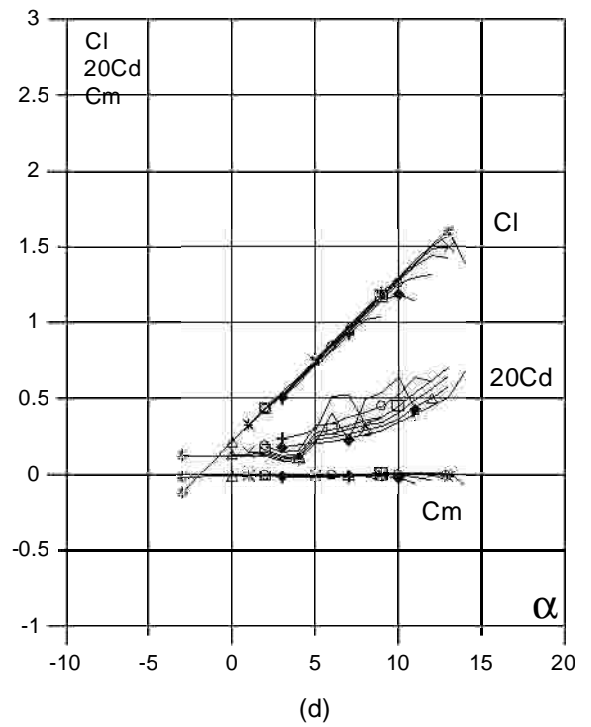
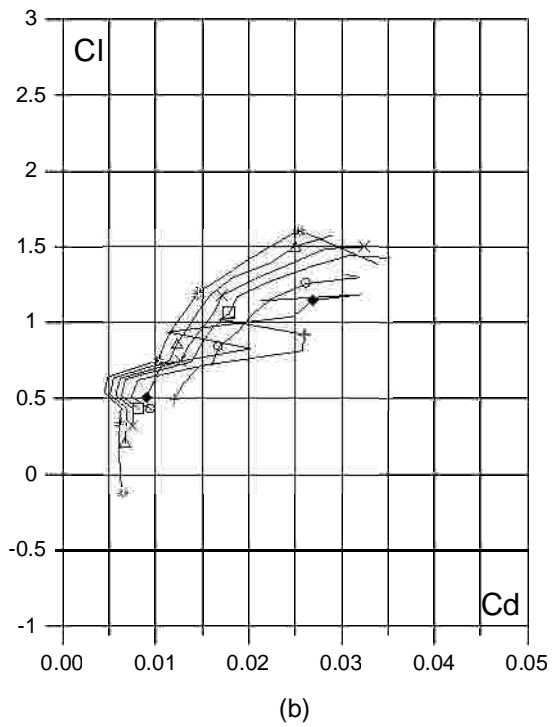
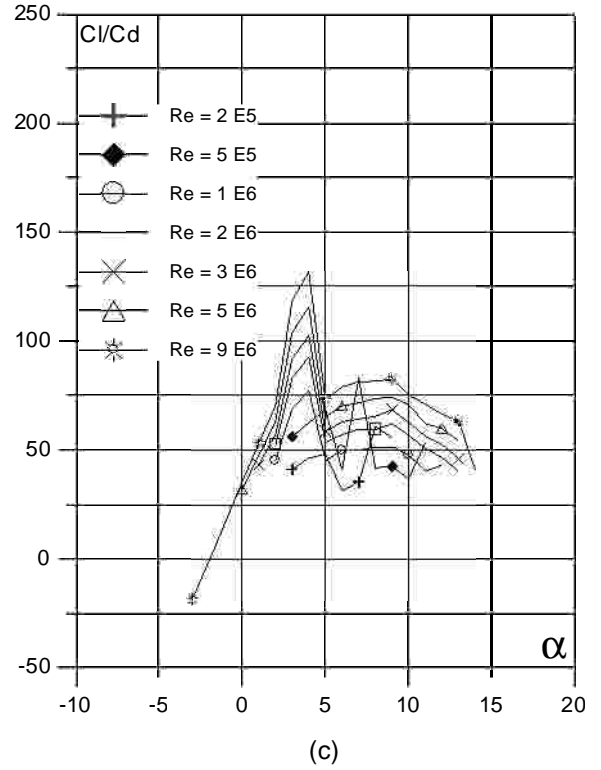
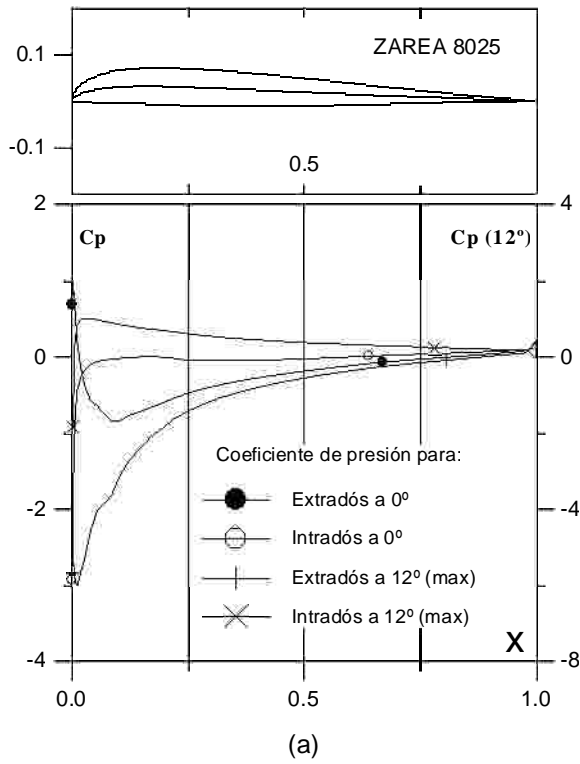


Fig. 4.3.18. (a)  $C_p$  ( $0^\circ \alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 8025. Met. Panel y Capa Limite. 100 Puntos.

Fig. 4.3.18. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 8025.

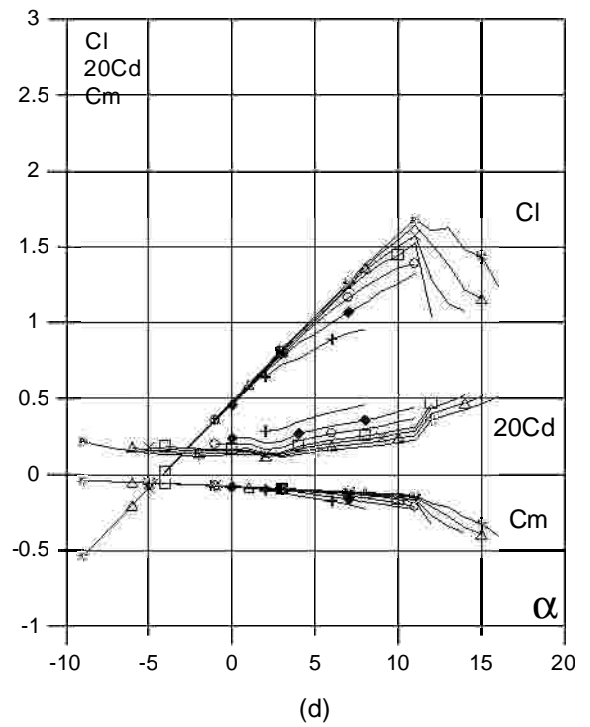
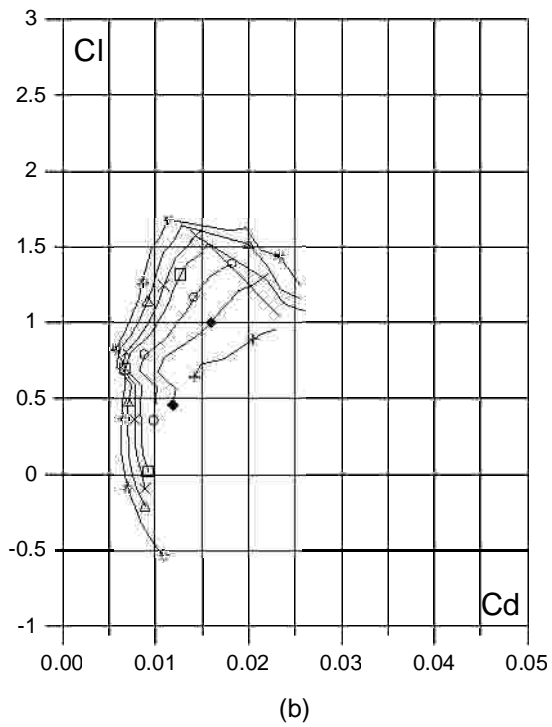
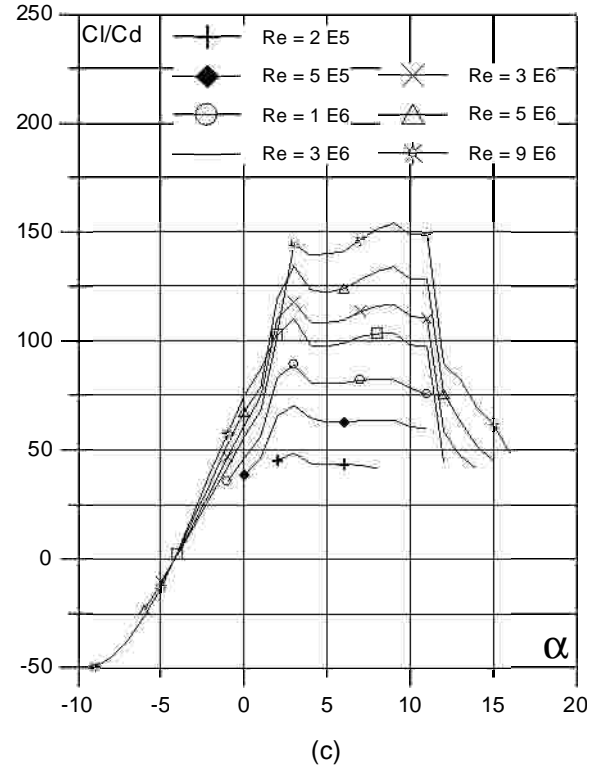
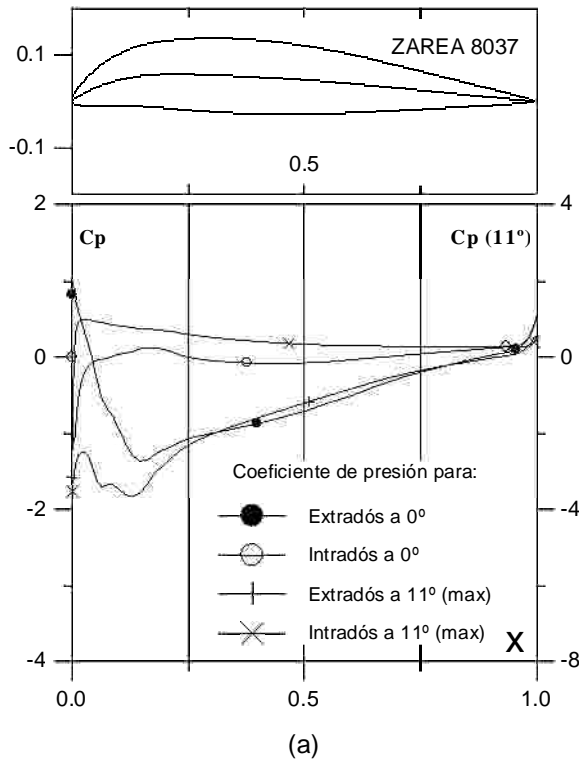


Fig. 4.3.19 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $11^\circ$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 8037. Met. Panel y Capa Limite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.19. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 8037.

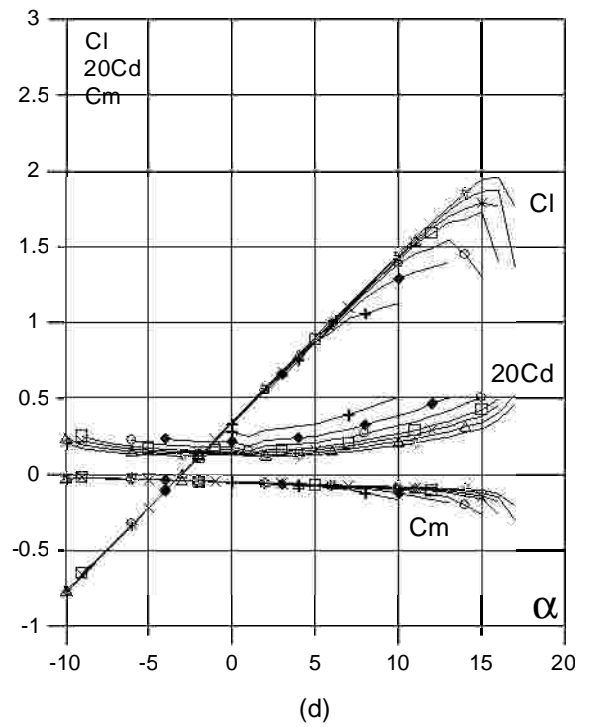
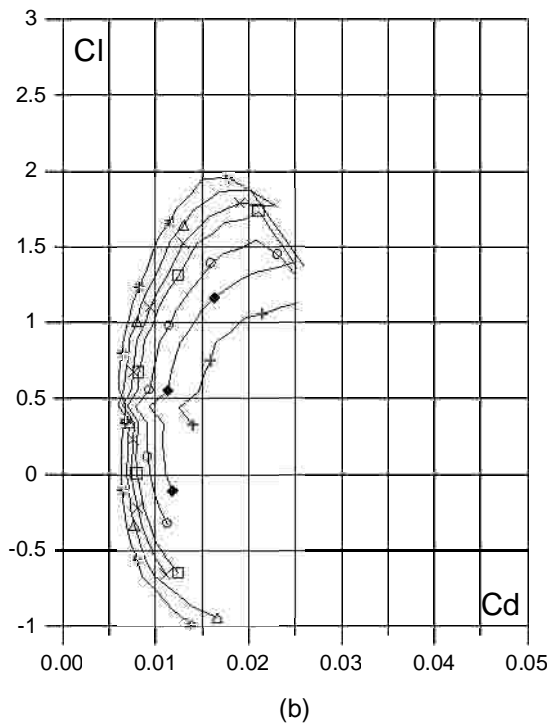
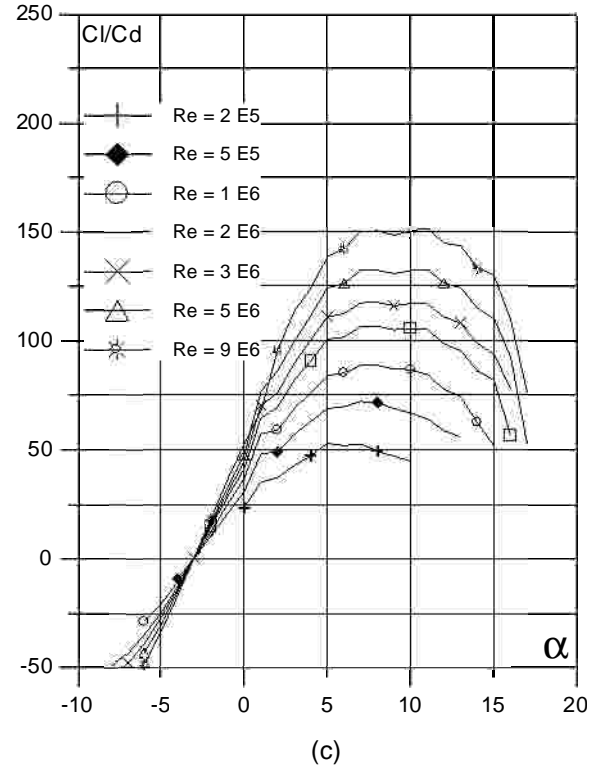
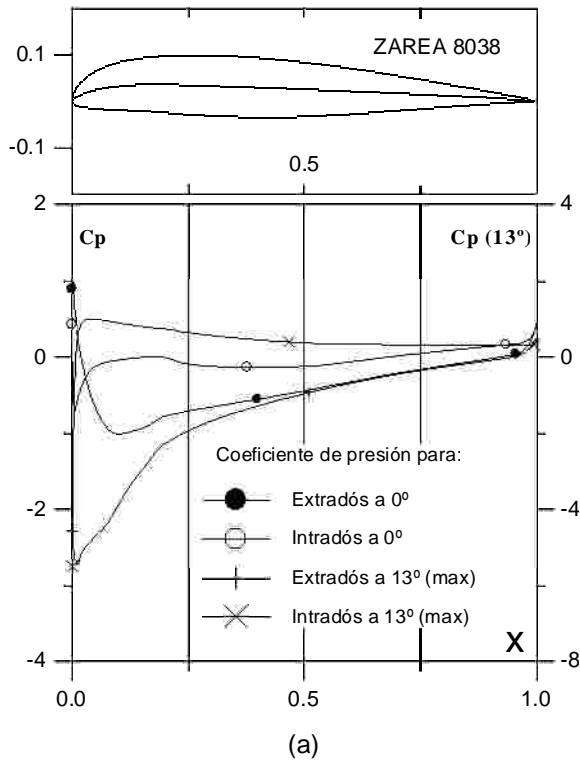


Fig. 4.3.20. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$   $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs. X para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 8038. Met. Panel y Capa Límite. 140 Puntos.

Fig. 4.3.20. (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ-.



#### 4.4 Evaluación Computacional del los Perfiles SZ 2400

Los perfiles SZ 2400 es la serie de perfiles más recientemente del Prof. Zarea, diseñados por el método de modificación del borde de fuga en perfil ACA y FX.

Los contornos de los perfiles SZ 2400 se presentan en la fig.4.4.1

A continuación se presenta las tablas de las características geométricas de los perfiles SZ 2400, tabla 4.4.1

Las figuras 4.4.2 a 4.4.31 contienen las curvas características de los perfiles SZ 2400

Tabla 4.4.1 Características Geométricas de la serie SZ 2400

Perfil	E.max (%c)	x- E.max (%c)	Fmax(%c)	x-Fmax (%c)	Area c.u.
SZ2470	13.73	0.2770	2.76	0.5590	0.0854
SZ2471	12.95	0.2550	3.49	0.5590	0.0763
SZ2472	13.78	0.2990	2.42	0.2470	0.0864
SZ2473	14.63	0.3040	2.16	0.7680	0.0920
SZ2474	13.47	0.3010	2.58	0.2490	0.0887
SZ2475	15.35	0.2800	1.61	0.3230	0.1047
SZ2476	11.81	0.2480	3.60	0.3860	0.0780
SZ2477	13.32	0.2510	2.88	0.4020	0.0883
SZ2478	13.78	0.2920	2.42	0.2380	0.0947
SZ2479	11.75	0.2840	3.41	0.2840	0.0763
SZ2480	12.32	0.2740	3.13	0.3080	0.0848
SZ2481	15.23	0.2940	1.68	0.2500	0.1062
SZ2482	17.26	0.3150	0.82	0.1950	0.1208
SZ2483	17.88	0.3070	0.58	0.9340	0.1250
SZ2484	12.64	0.2620	3.28	0.5130	0.0775
SZ2485	18.05	0.3090	5.00	0.4650	0.1166
SZ2486	17.13	0.2850	5.71	0.4770	0.1075
SZ2487	18.27	0.3440	4.62	0.3810	0.1176
SZ2488	19.14	0.3490	4.18	0.3710	0.1232
SZ2489	17.98	0.3520	4.76	0.3580	0.1200
SZ2490	19.70	0.3180	3.97	0.3990	0.1359
SZ2491	15.95	0.2820	5.97	0.4030	0.1092
SZ2492	17.47	0.2810	5.26	0.4100	0.1195
SZ2493	18.22	0.3370	4.65	0.3730	0.1260
SZ2494	16.16	0.3330	5.69	0.3840	0.1075
SZ2495	16.67	0.3240	5.44	0.3800	0.1160
SZ2496	19.70	0.3460	3.90	0.3620	0.1375
SZ2497	21.85	0.3690	2.83	0.3280	0.1520
SZ2498	22.41	0.3560	2.54	0.3510	0.1562
SZ2499	16.87	0.2950	5.61	0.4470	0.1087

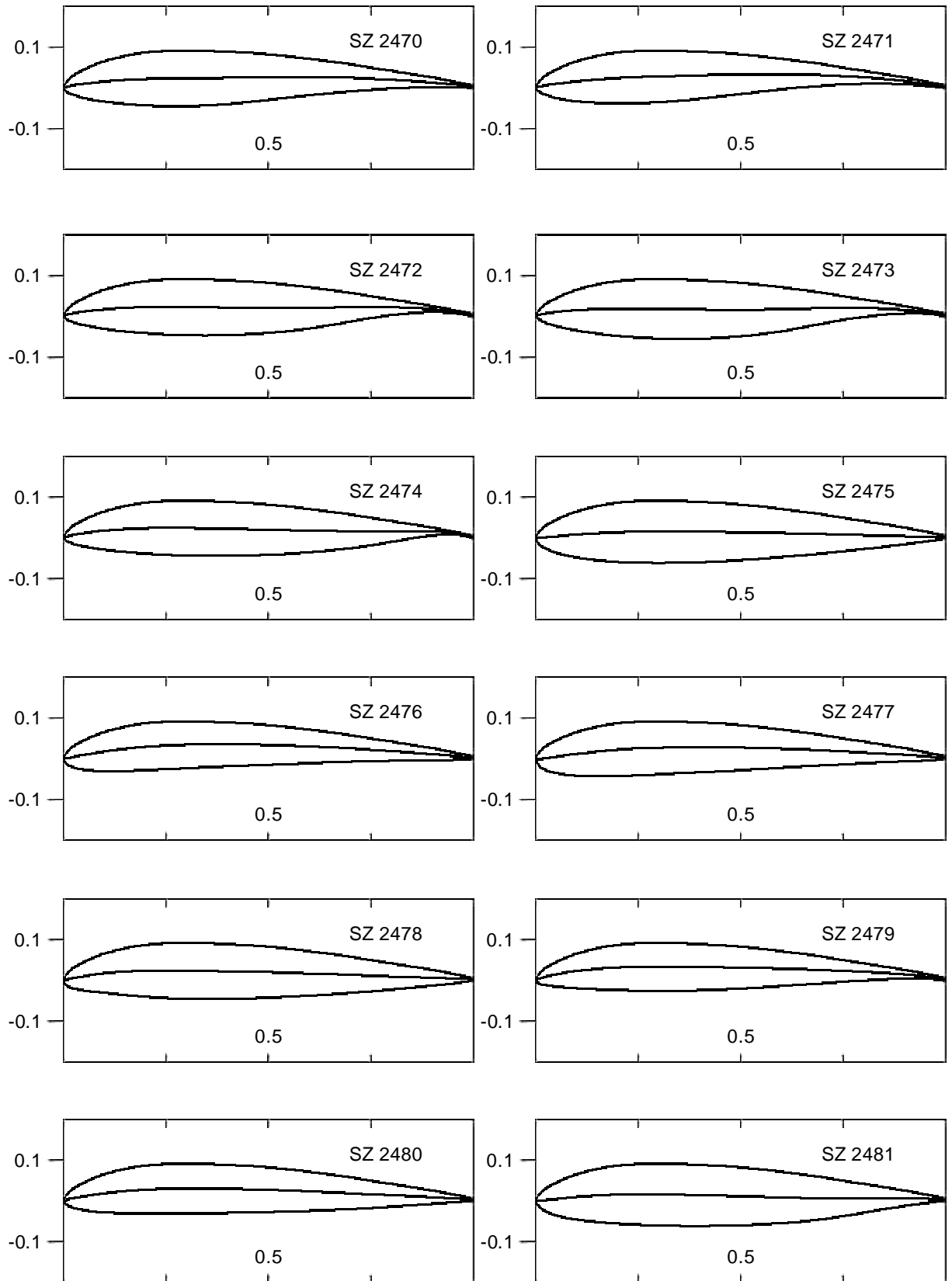


Fig. 4.4.1 Contornos de los perfiles de la serie SZ2400

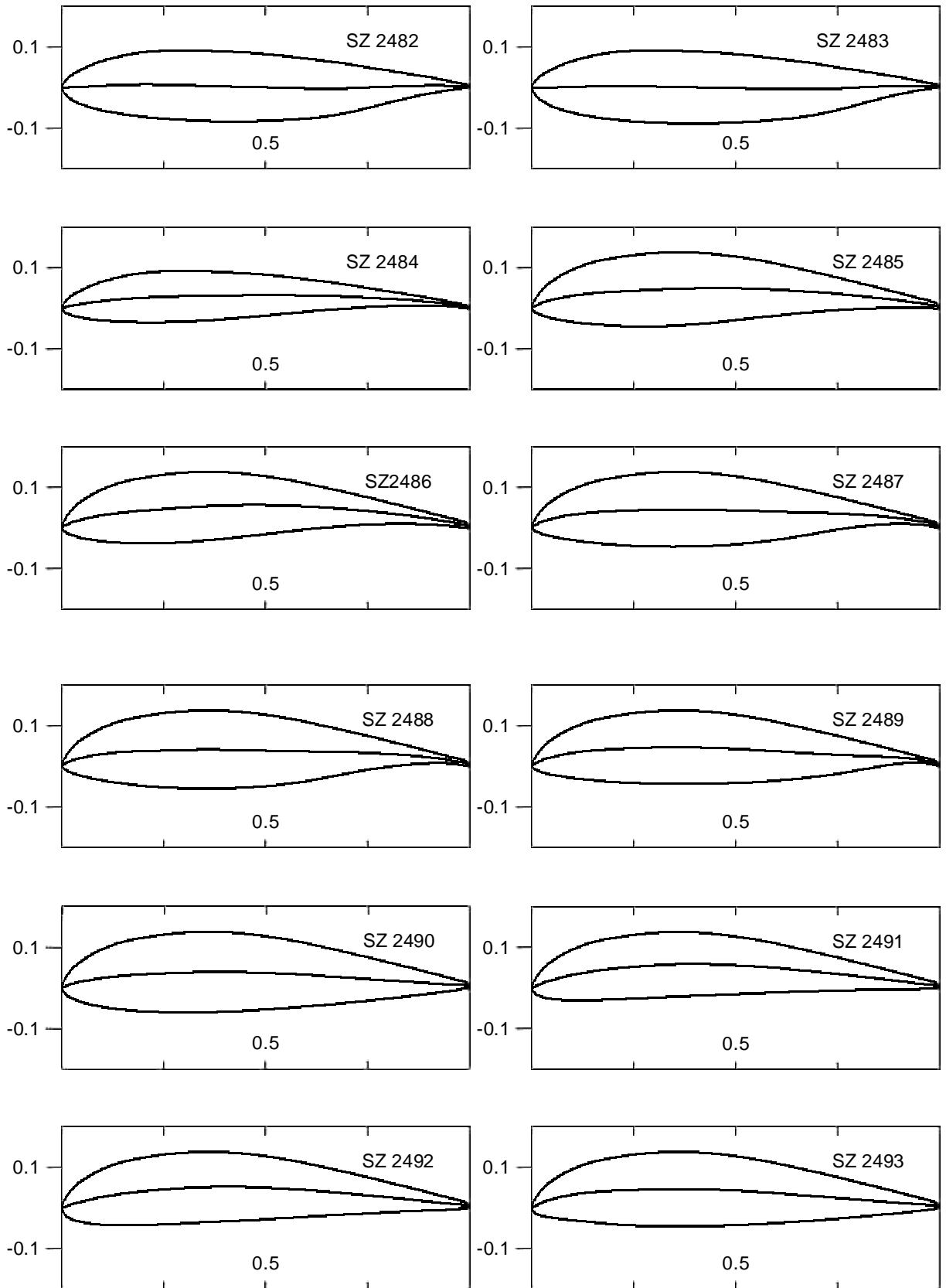


Fig. 4.4.1 Contornos de los perfiles de la serie SZ2400 (continuación)

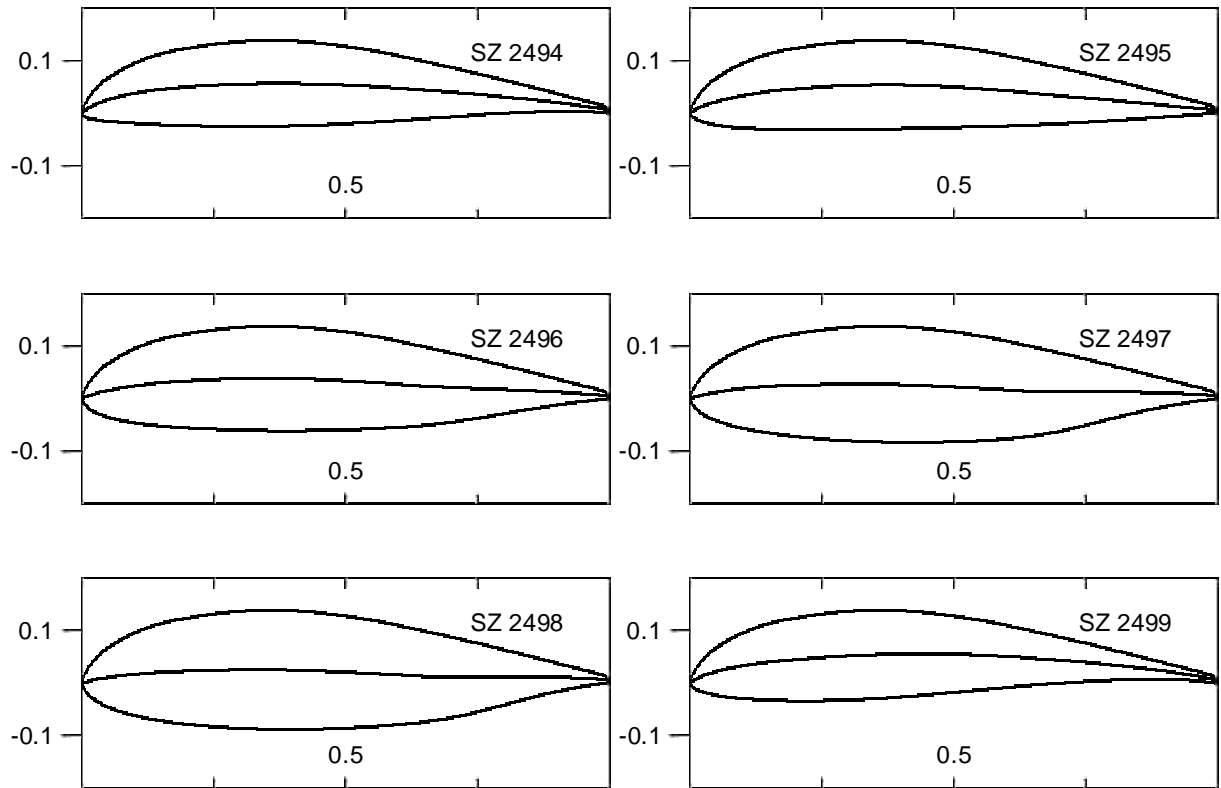


Fig. 4.4.1 Contornos de los perfiles de la serie SZ2400 (continuación)

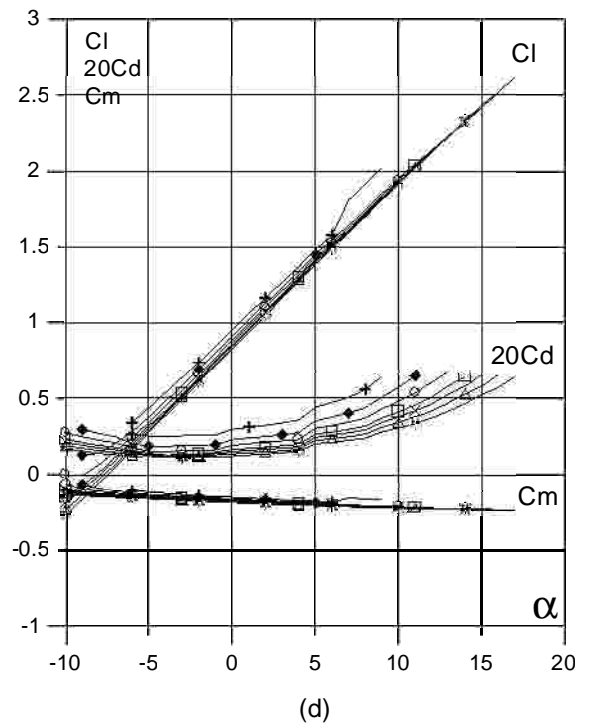
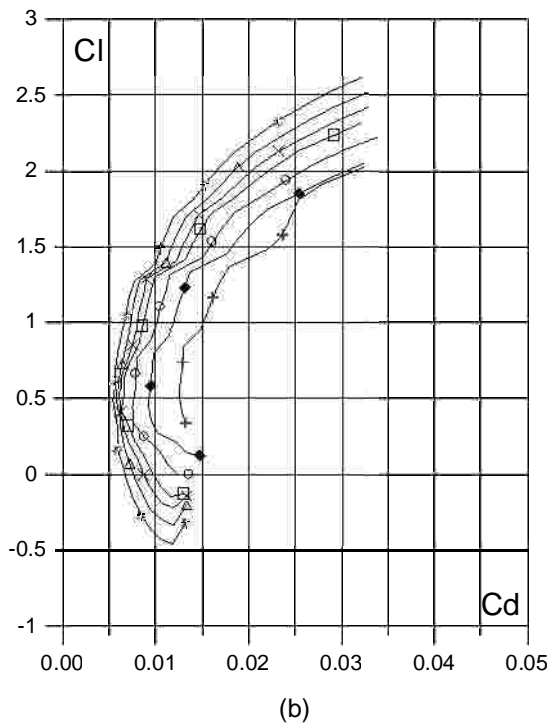
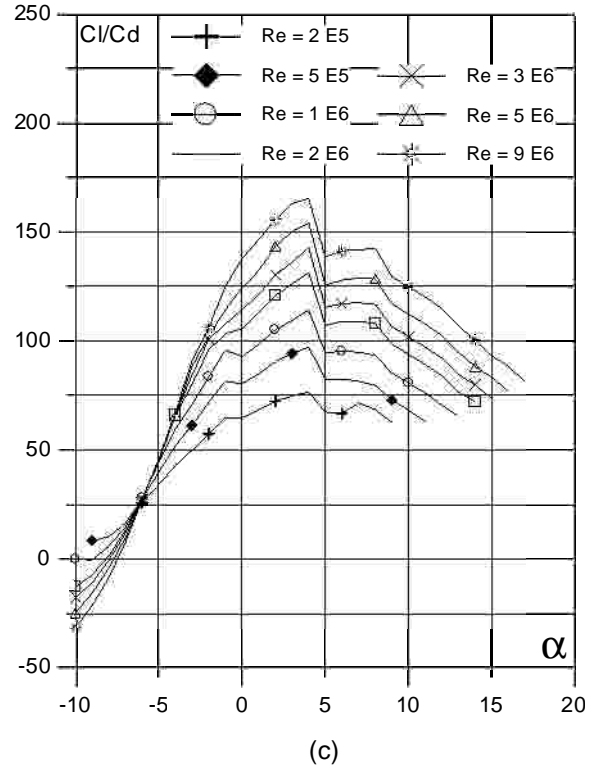
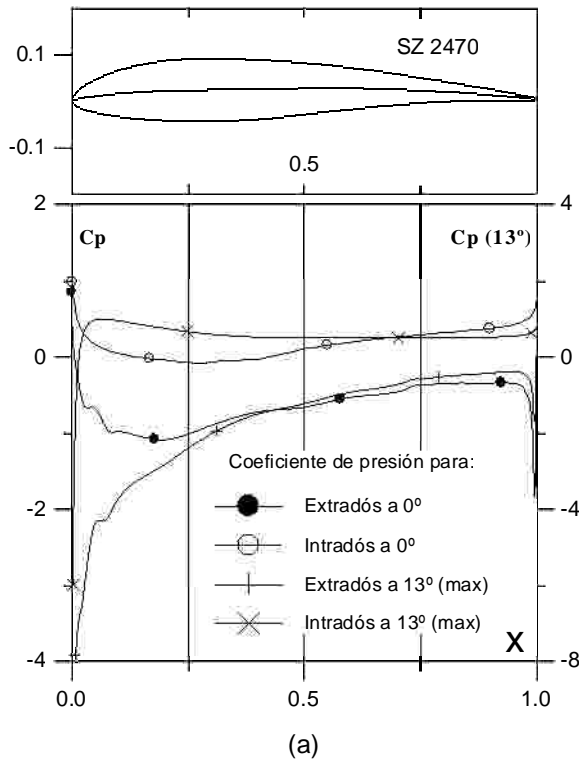


Fig. 4.4.2. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2470. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig. 4.4.2. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2470.

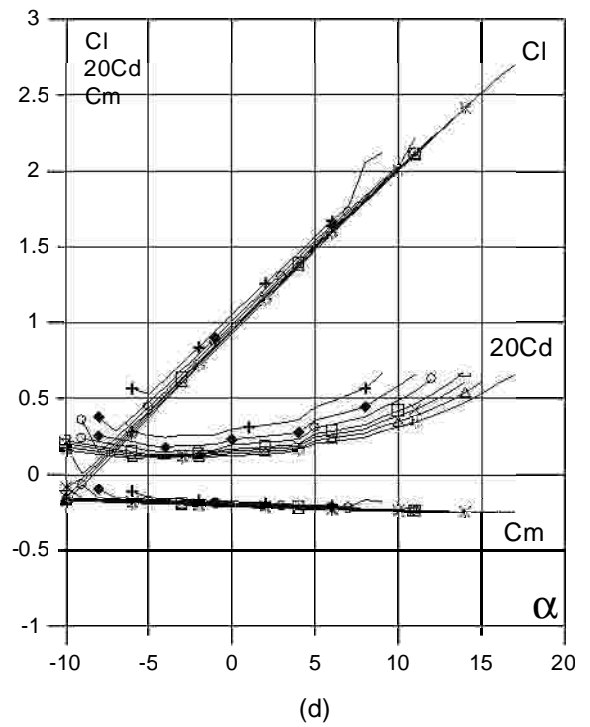
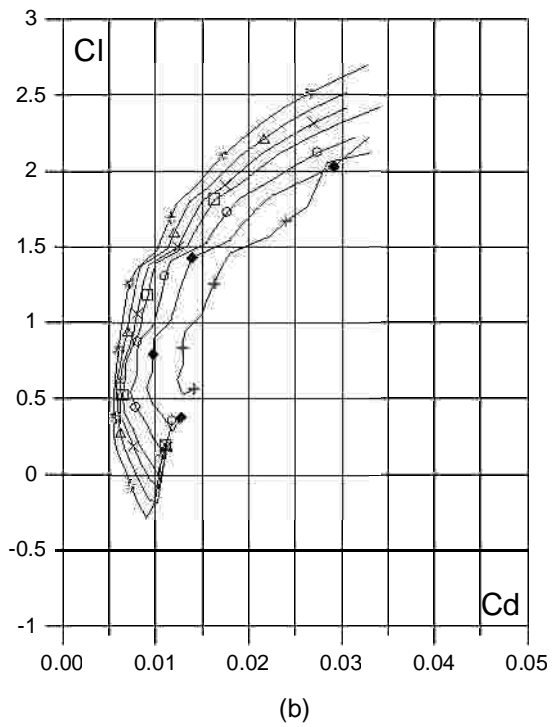
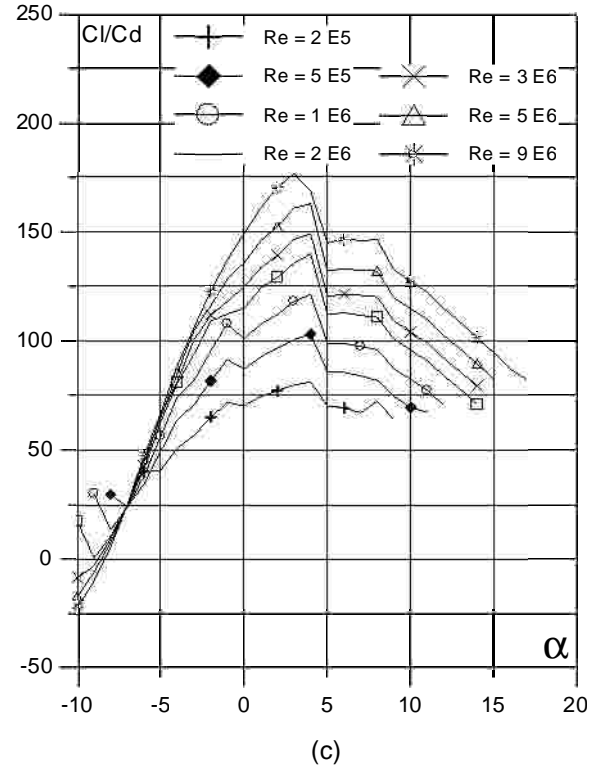
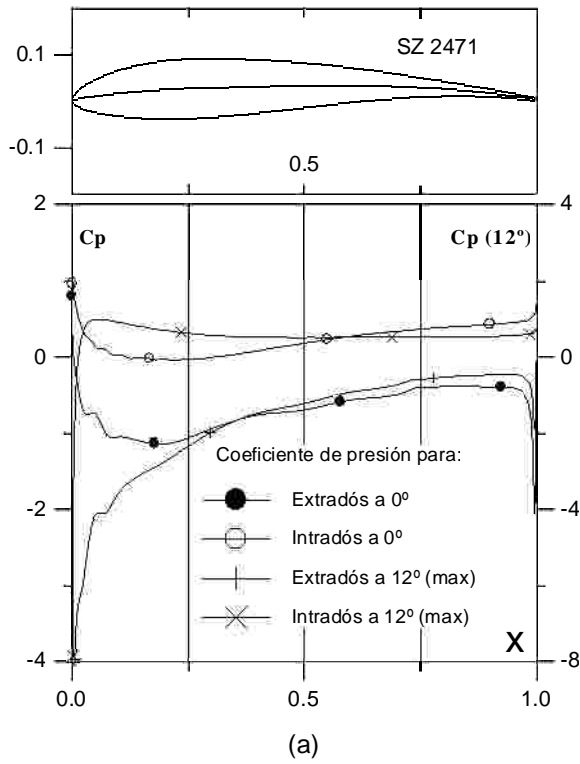


Fig. 4.4.3 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2471. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig.4.4.3 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2471.

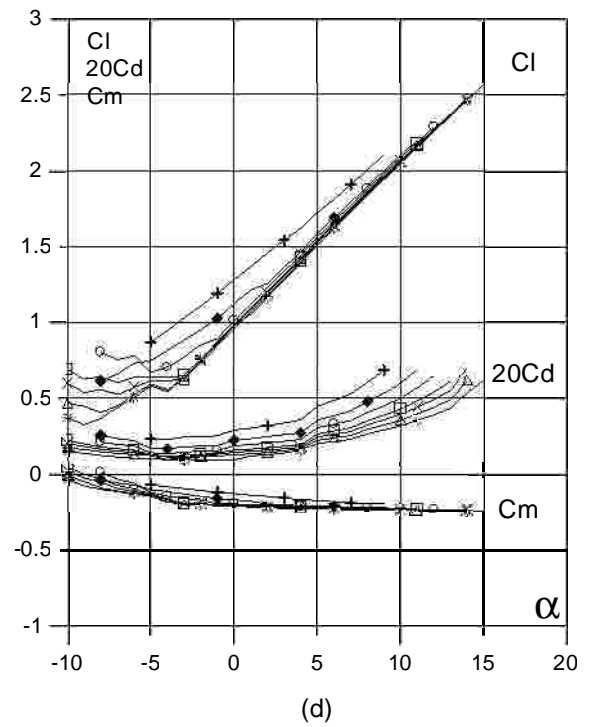
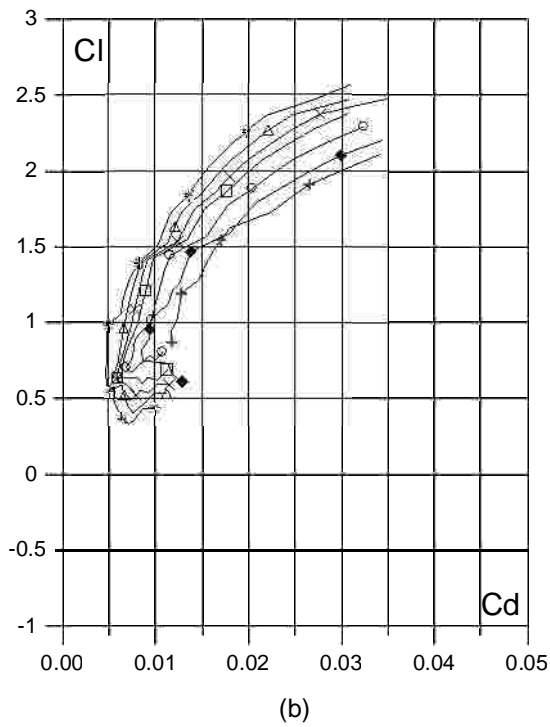
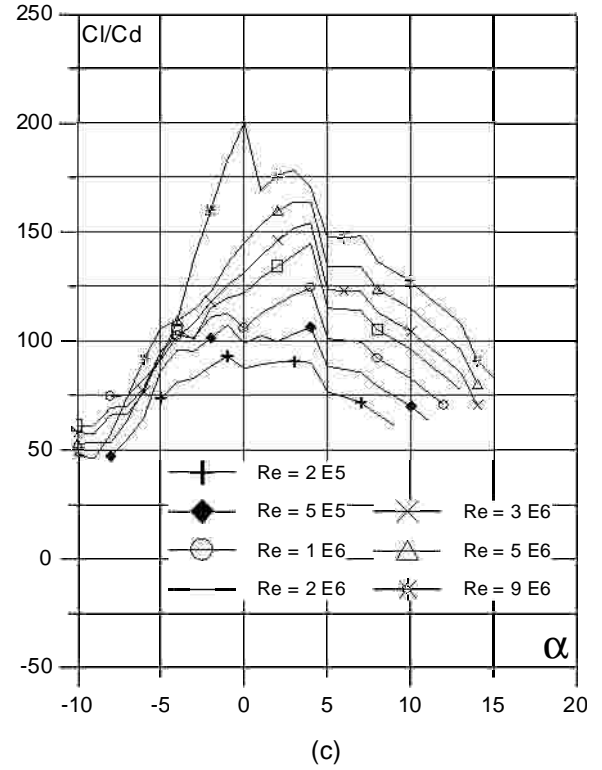
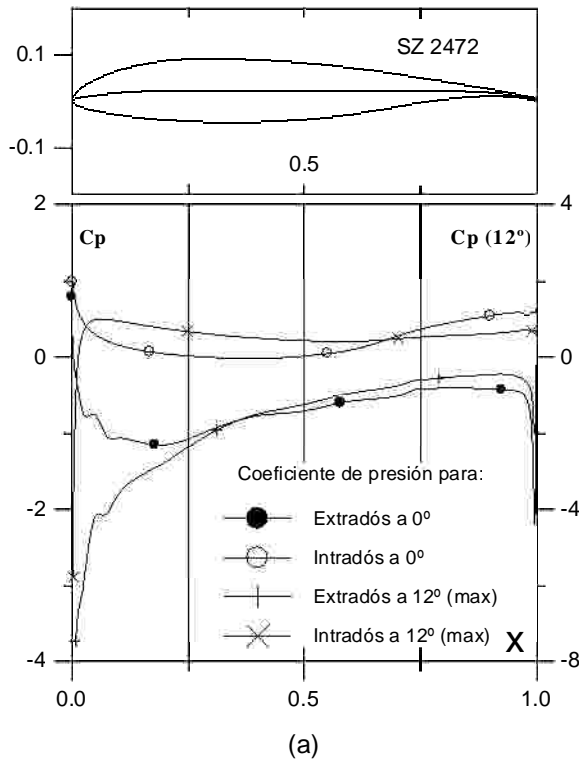


Fig.4.4.4. (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2472. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.4 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2472.

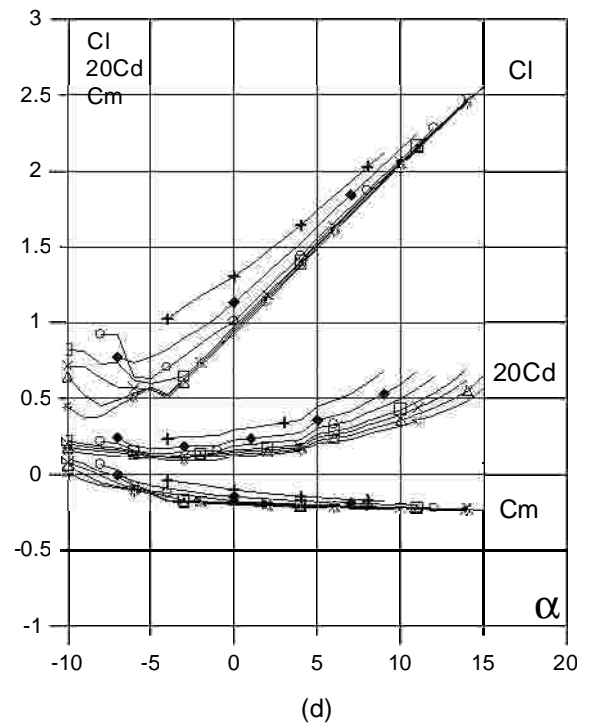
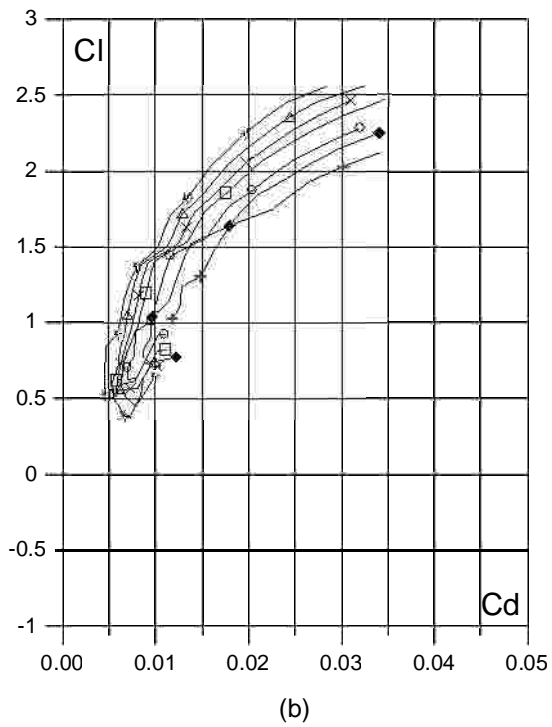
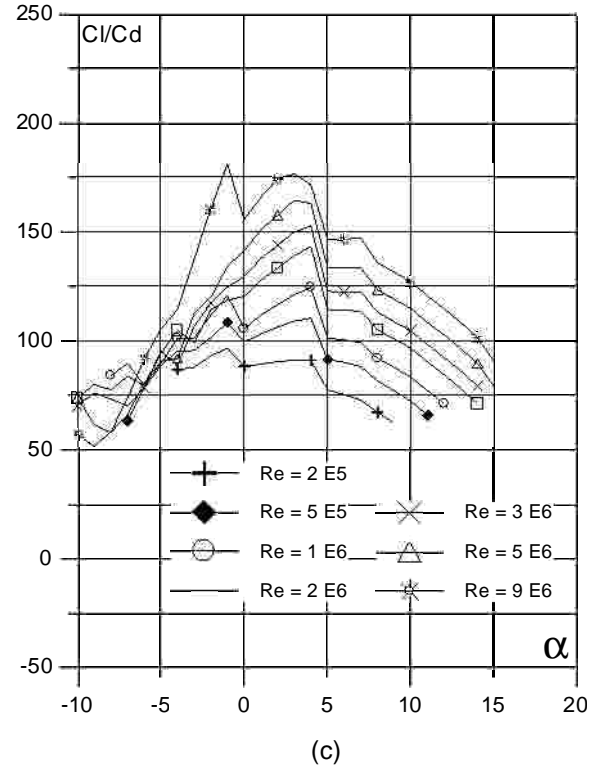
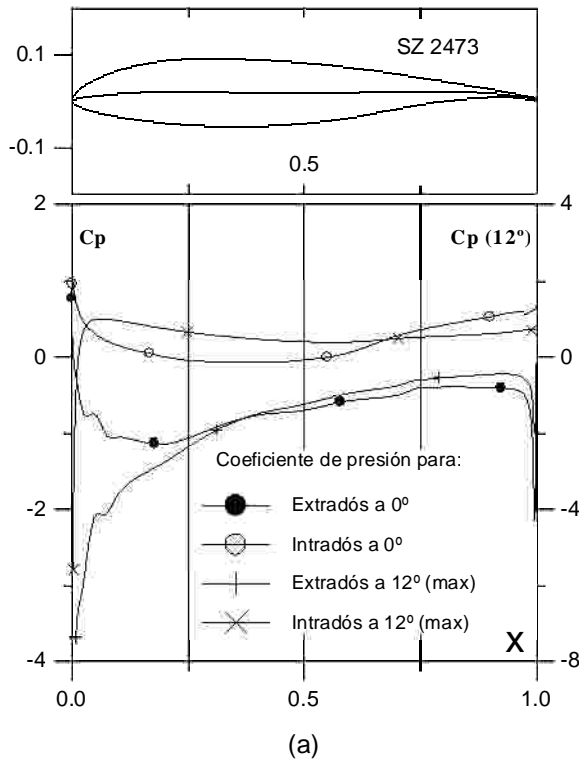


Fig. 4.4.5 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2473. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.5 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2473.



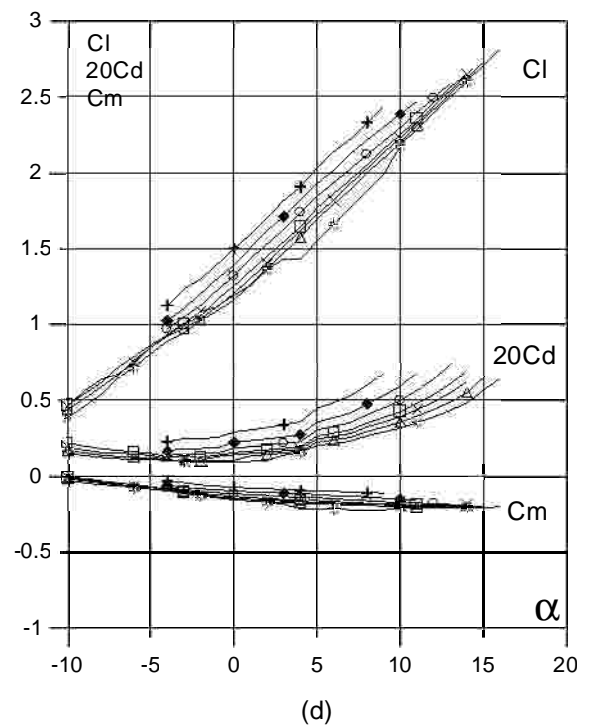
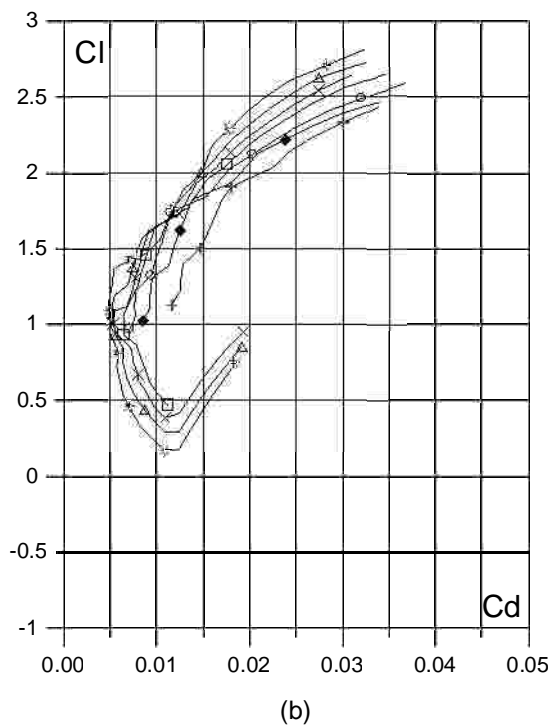
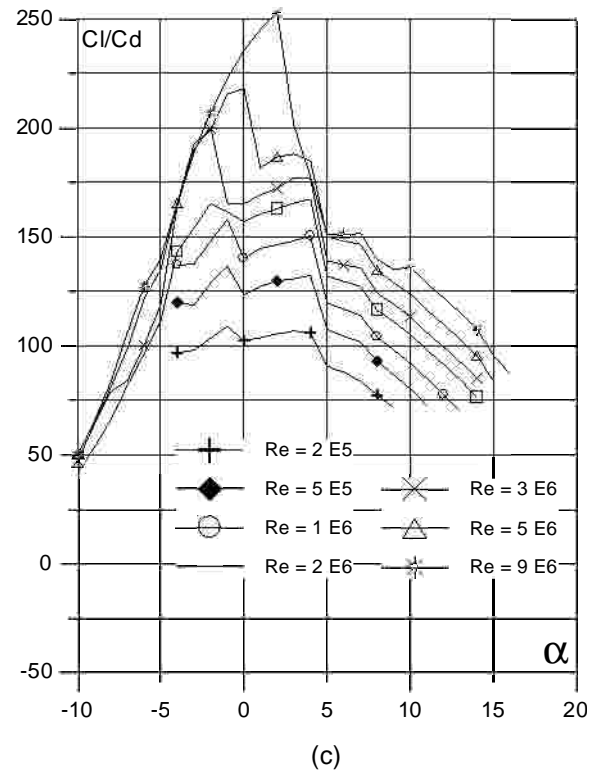
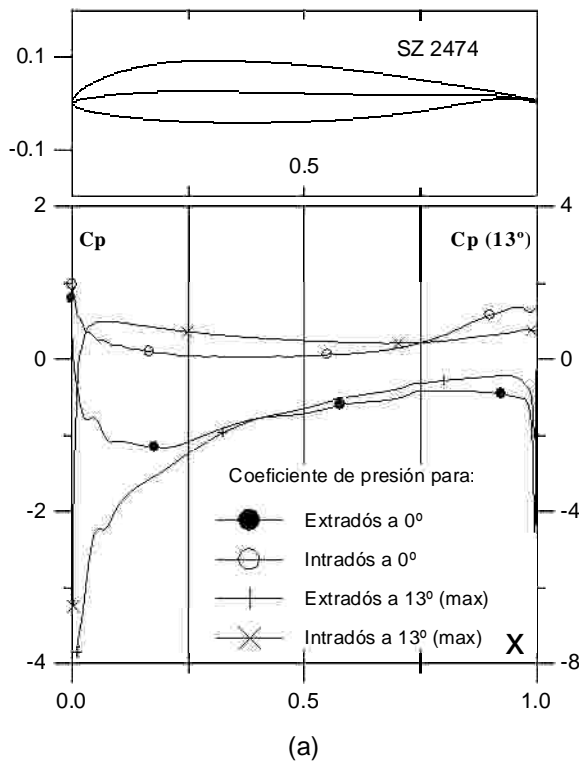


Fig.4.4.6 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2474. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.6 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2474.

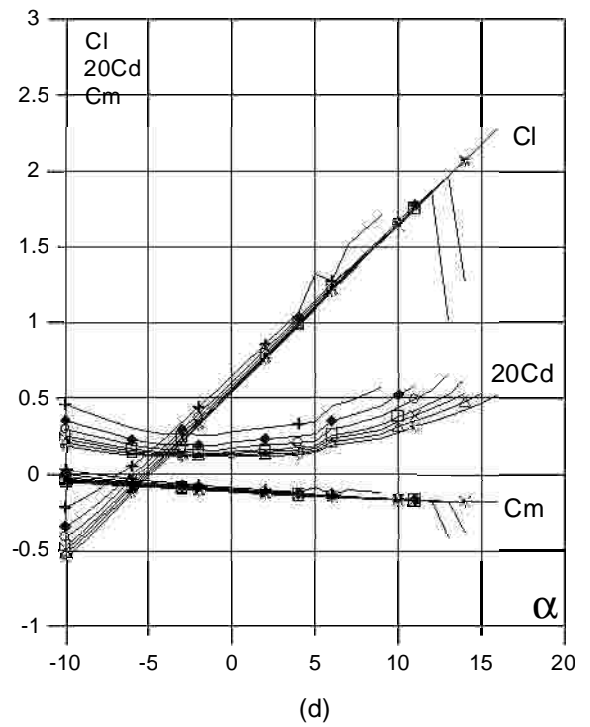
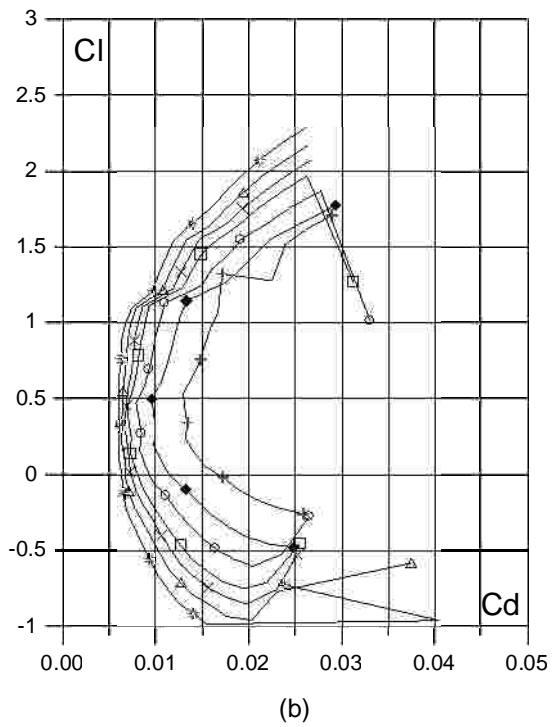
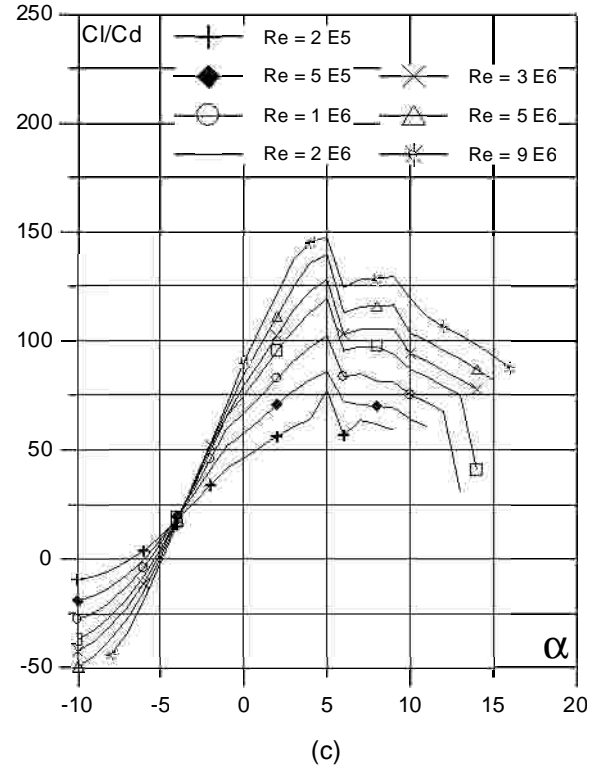
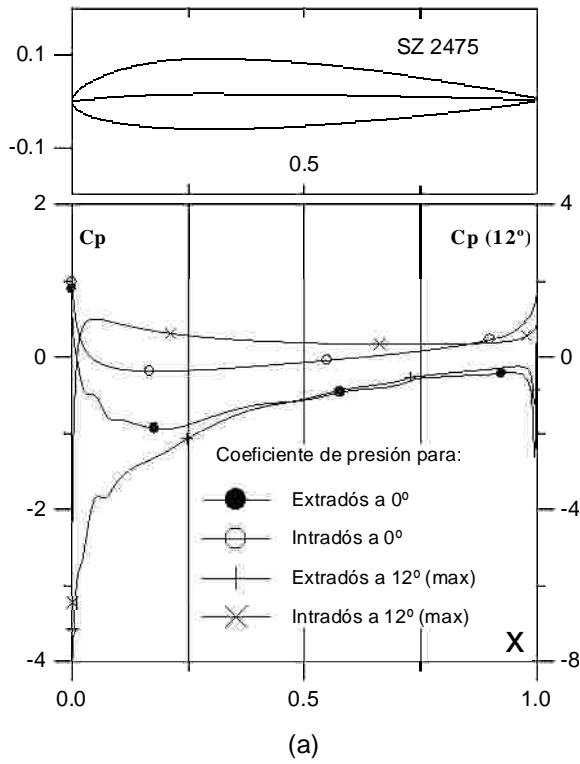


Fig.4.4.7 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2475. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.7 (c) Curvas de  $C_l/C_d$  y (d)  $C_l$ ,  $C_d$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2475.

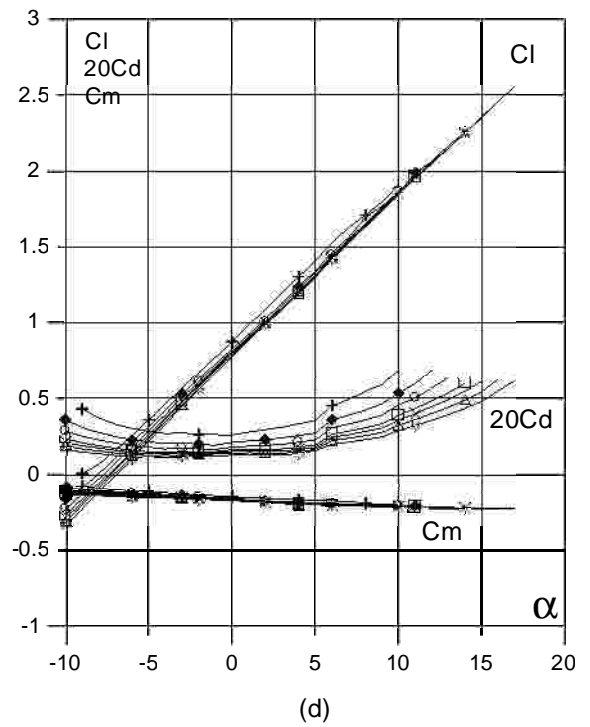
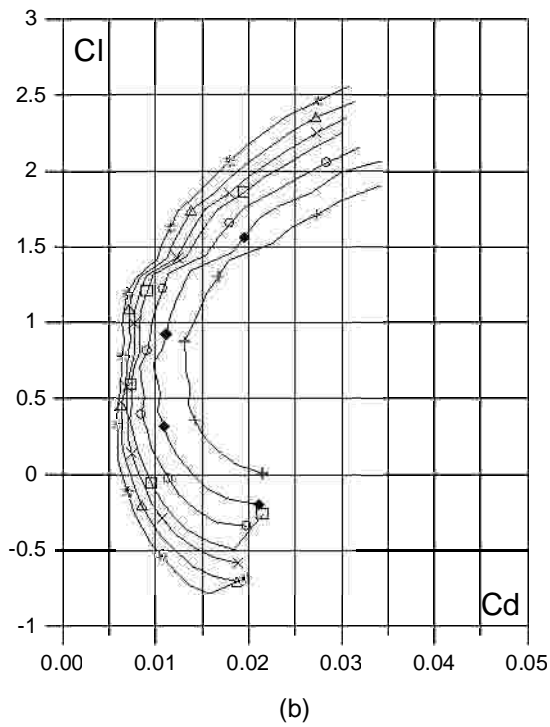
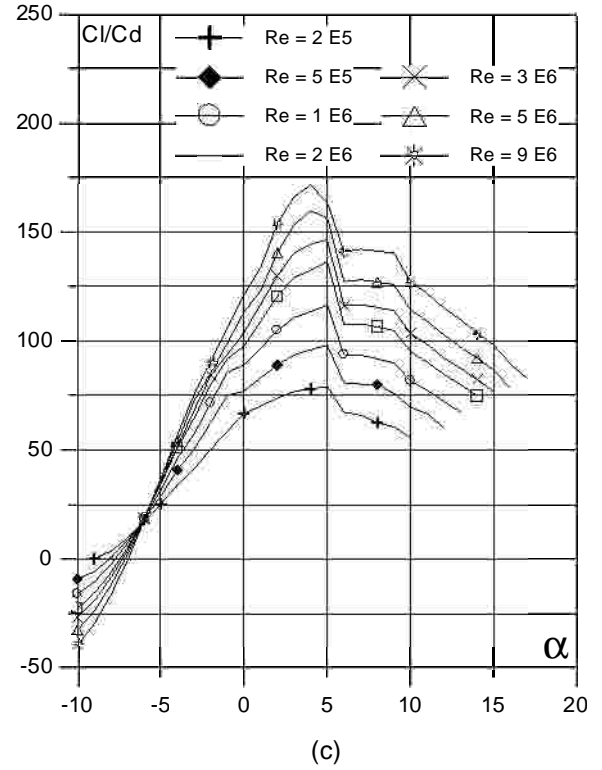
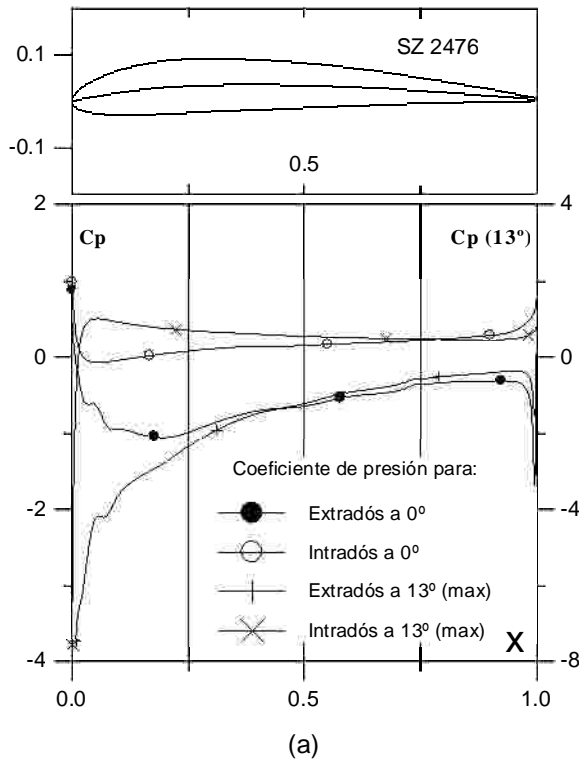


Fig.4.4.8 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $13^\circ$ ) para  $Cl_{max}$  vs.  $X$  para  $Re = 1 \times 10^6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2476. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.8 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2476.

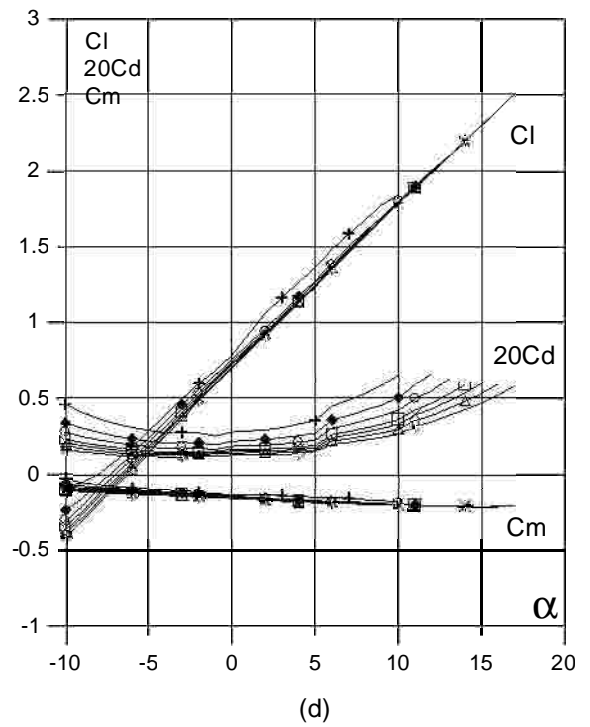
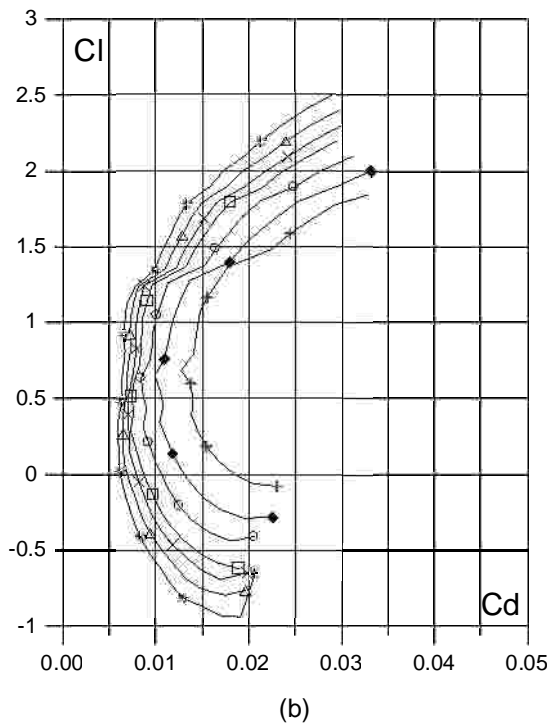
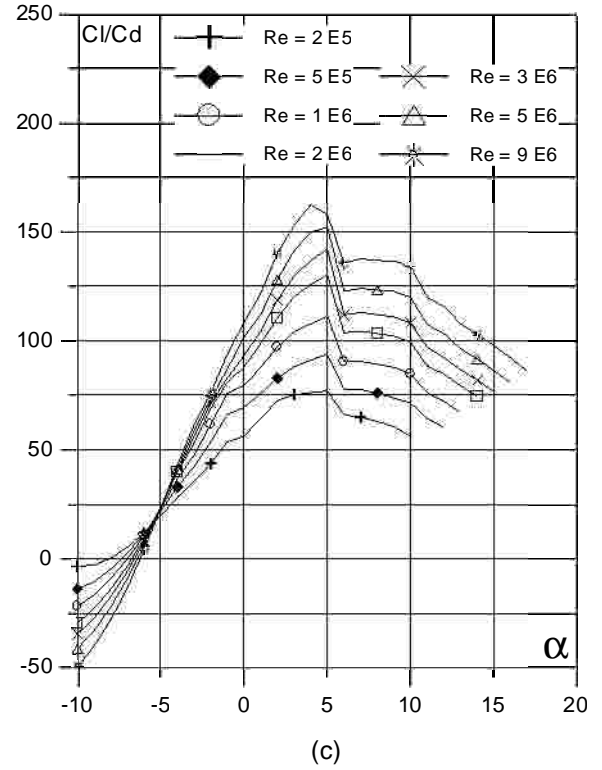
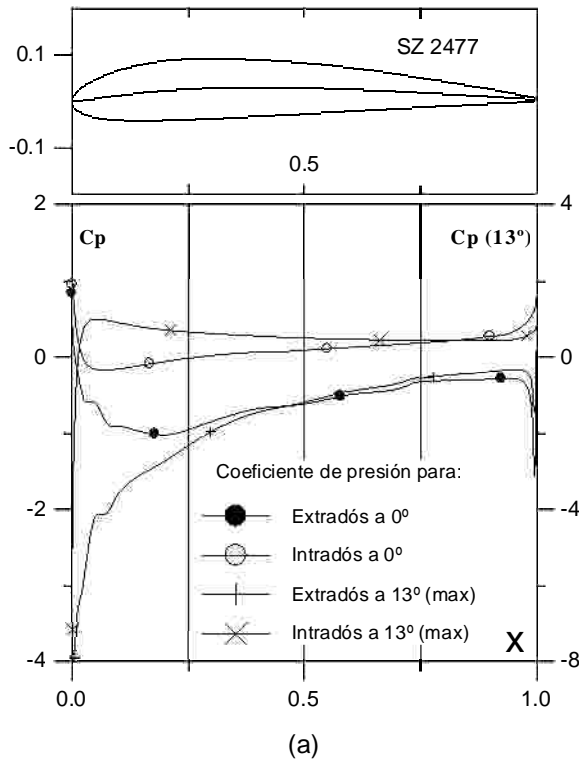


Fig.4.4.9 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2477. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig. 4.4.9 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2477.

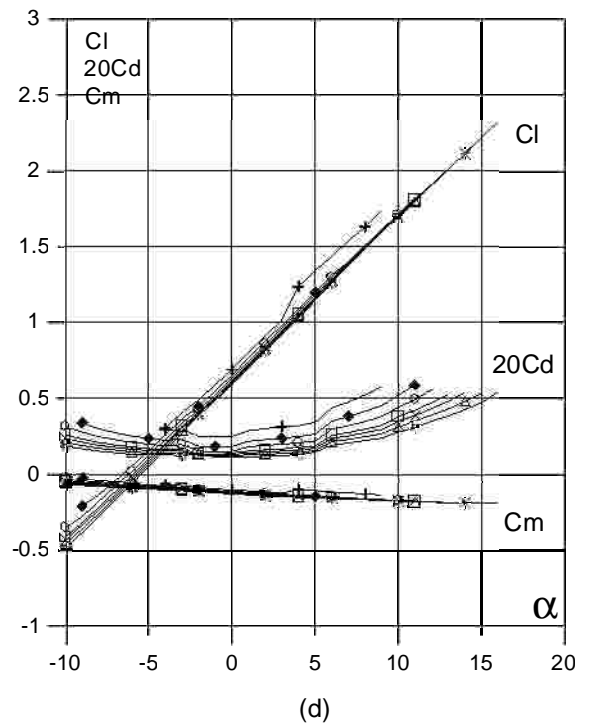
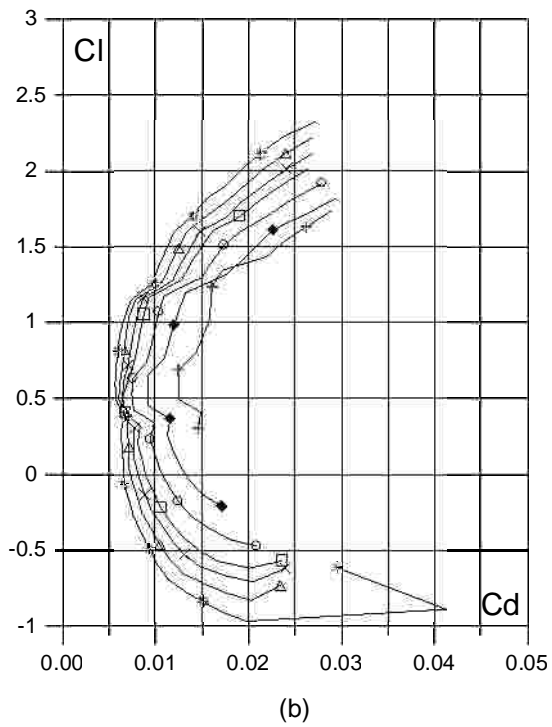
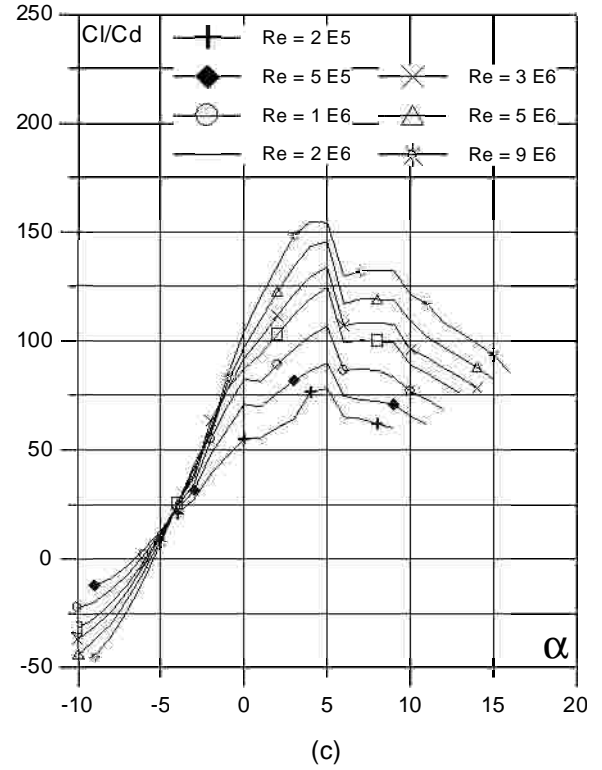
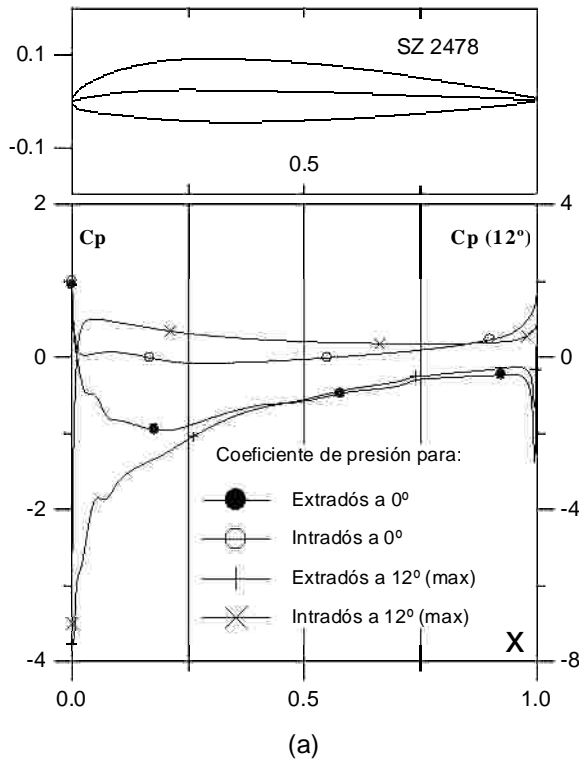


Fig.4.4.10 (a) Cp (0° y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2478. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.10. (c) Curvas de Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2478.

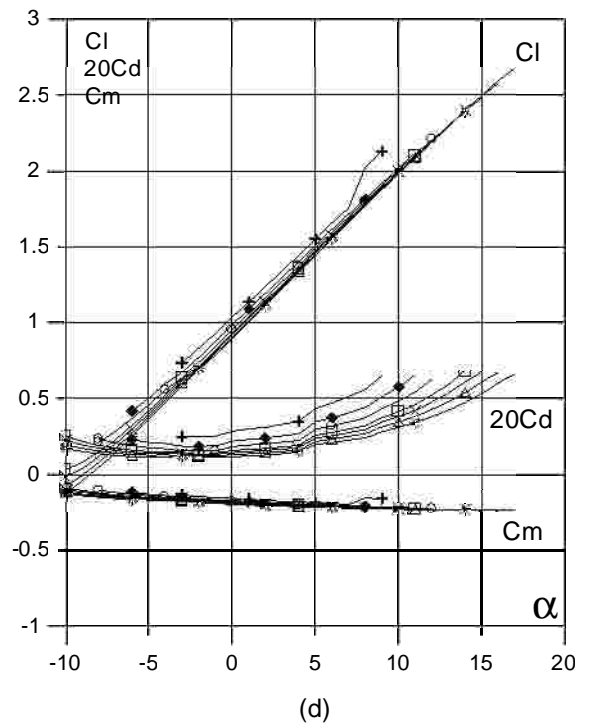
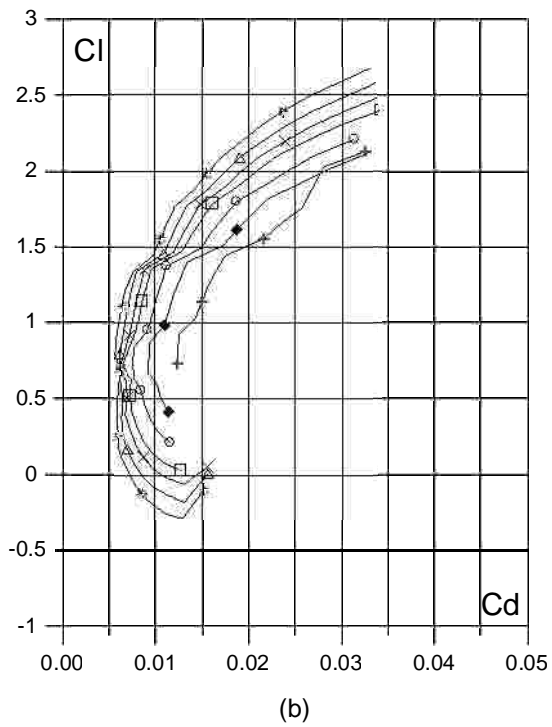
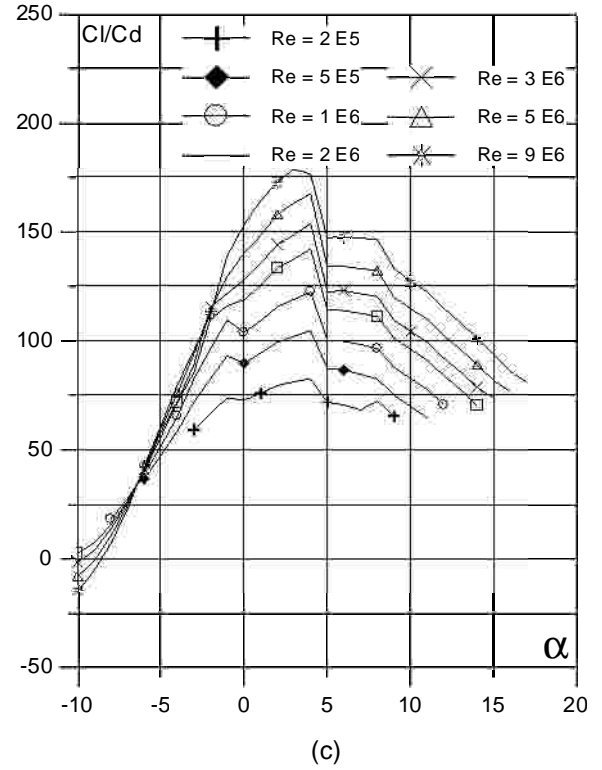
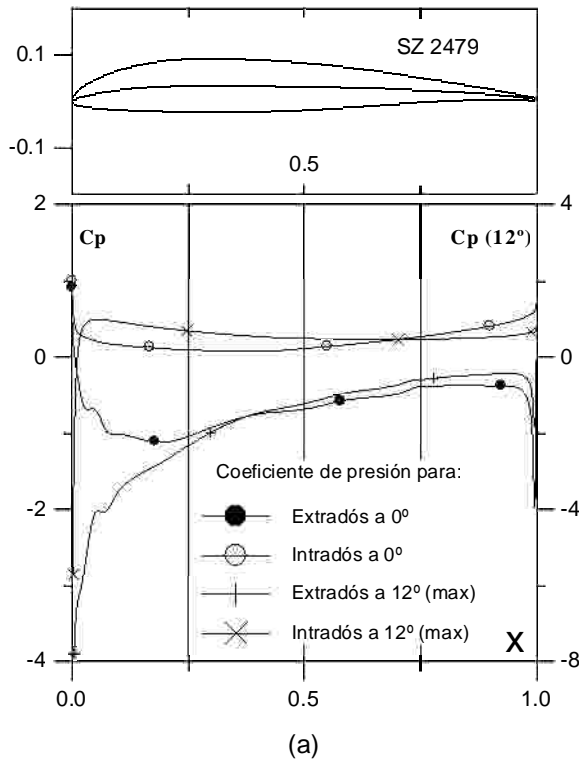


Fig.4.4.11 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2479. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.11 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2479.

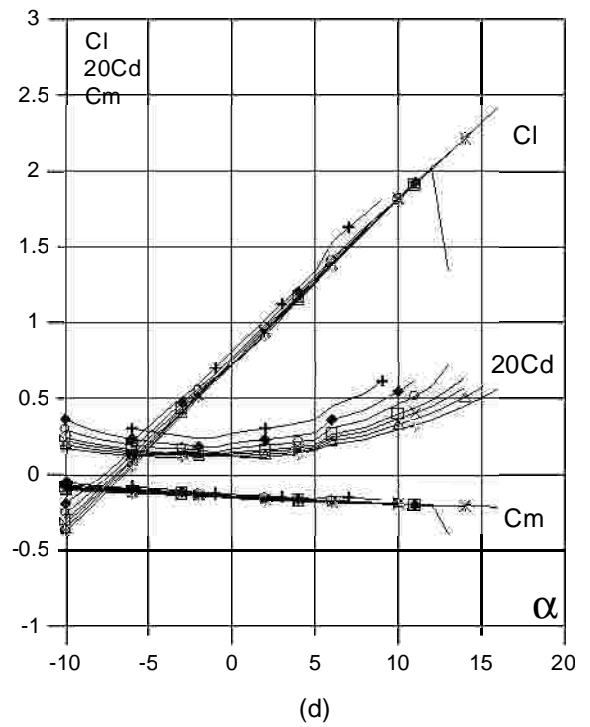
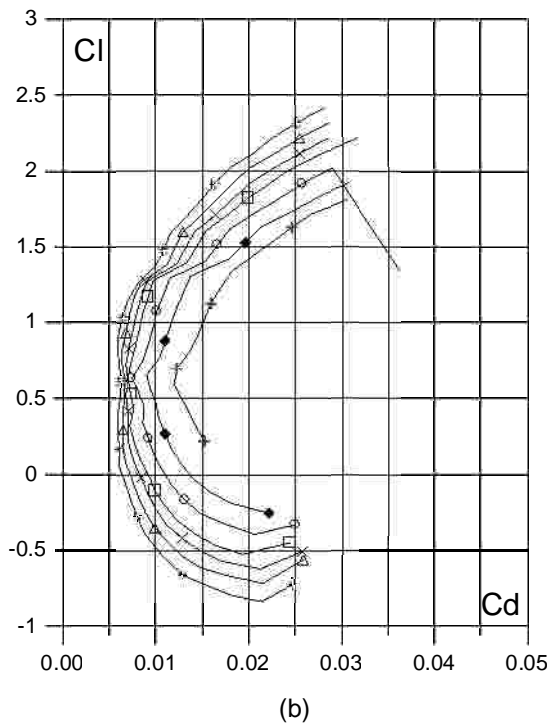
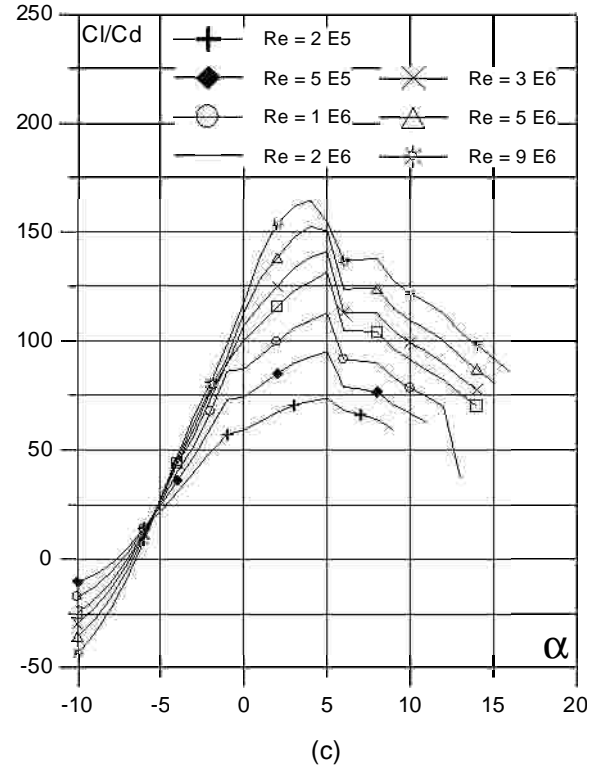
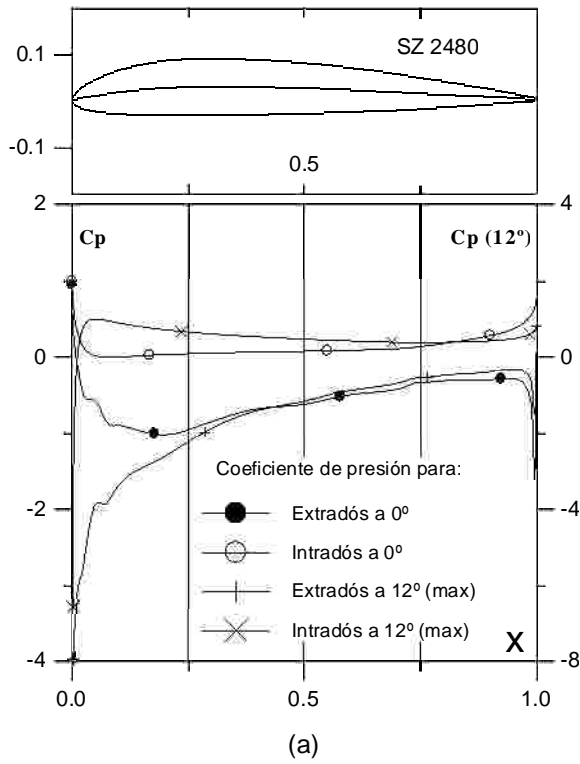


Fig.4.4.12 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2480. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.12 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2480.

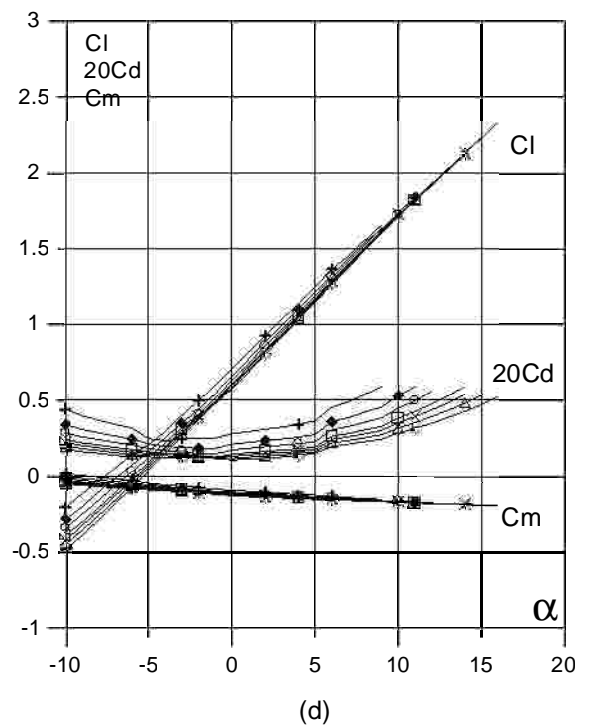
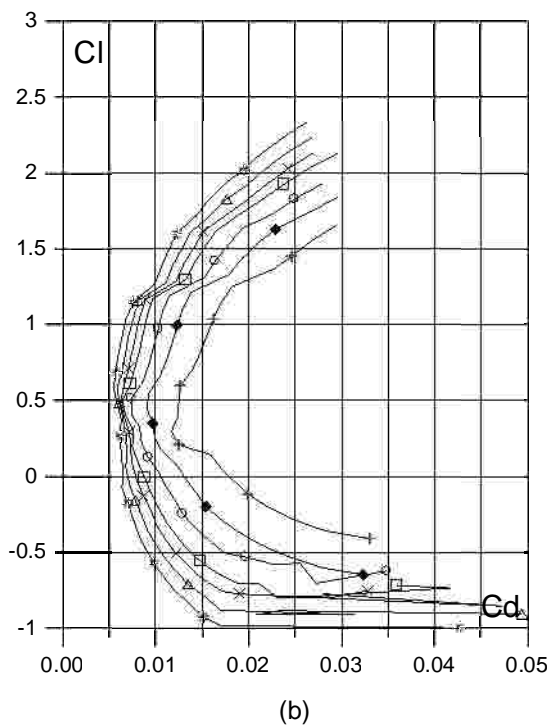
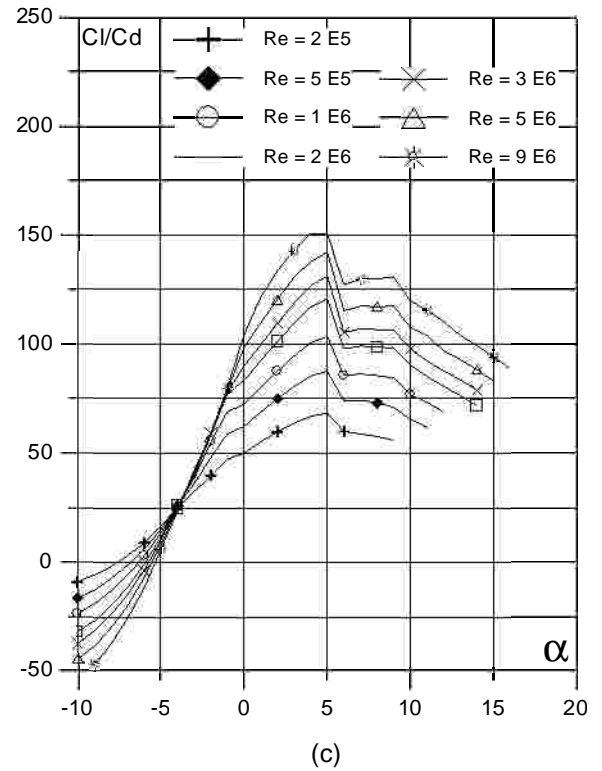
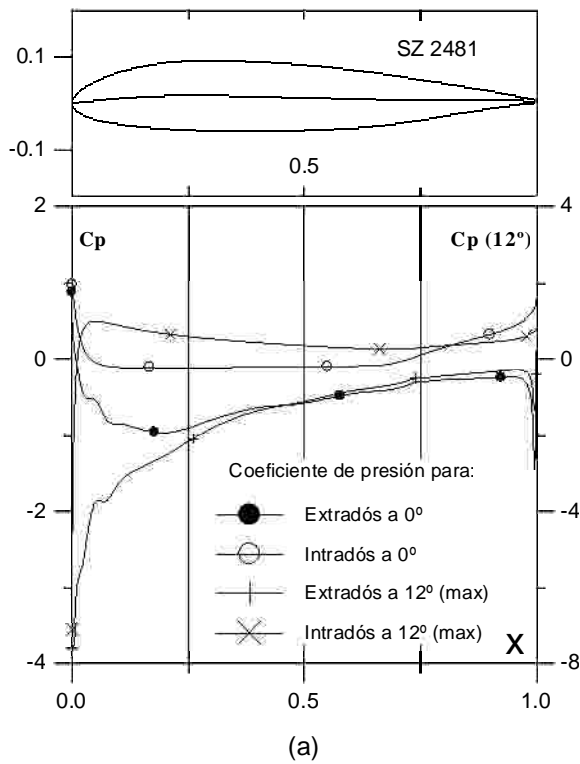


Fig.4.4.13 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2481. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.13 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2481.



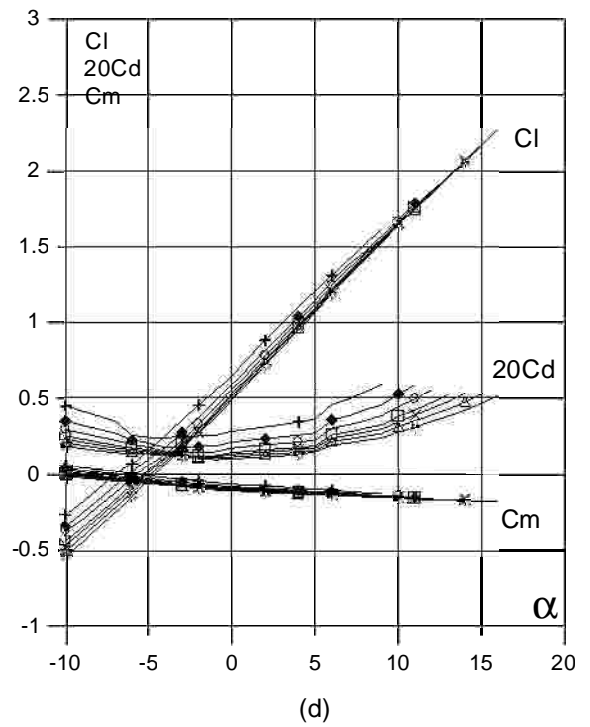
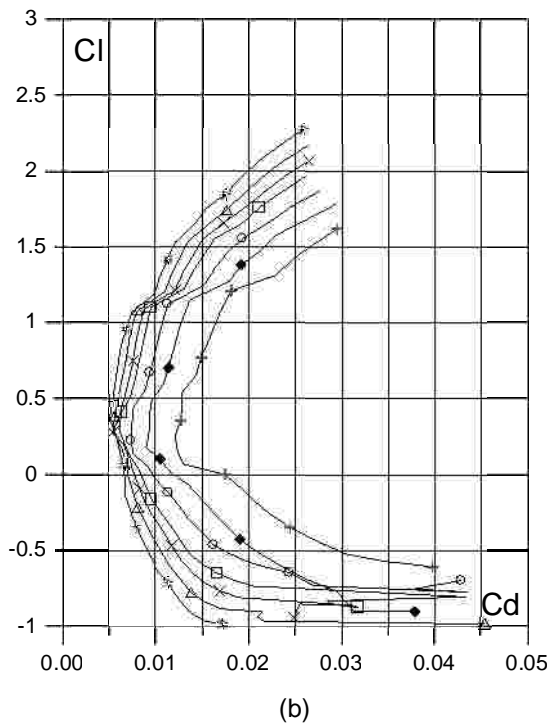
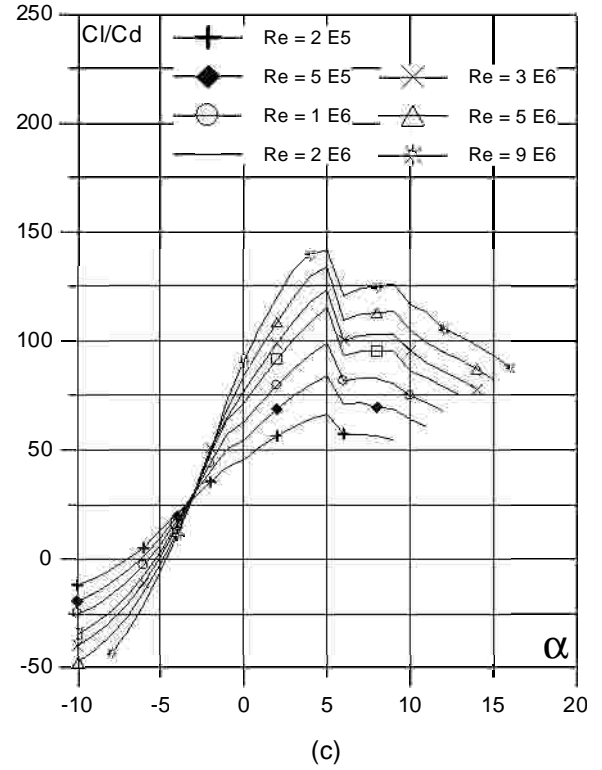
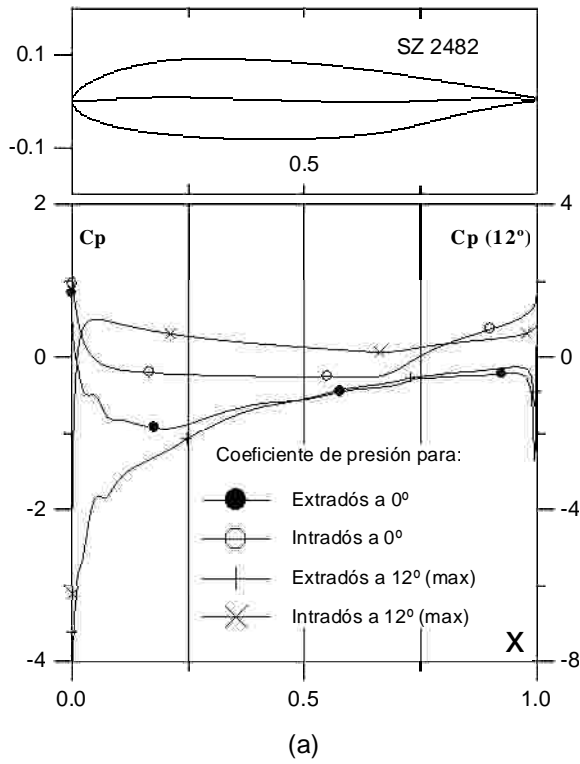


Fig.4.4.14 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $Cl_{max}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2482. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.14 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2482.

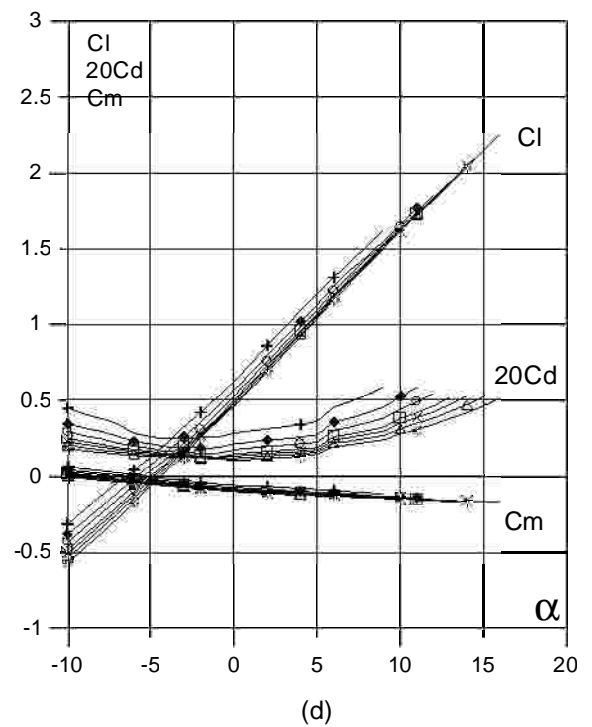
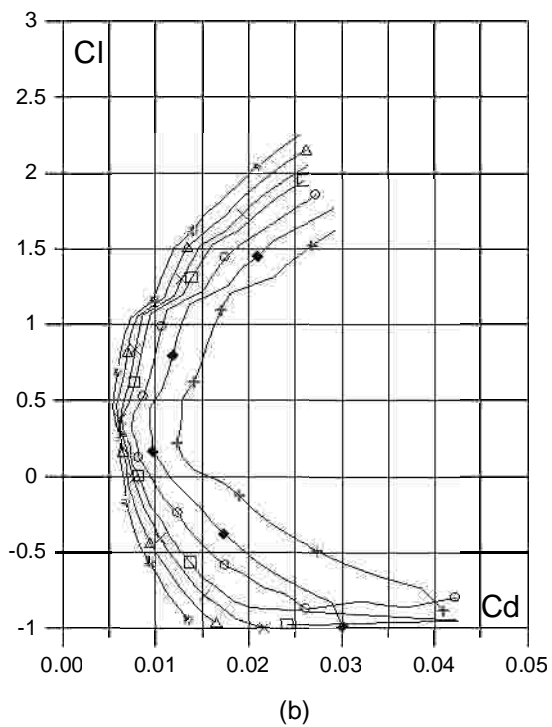
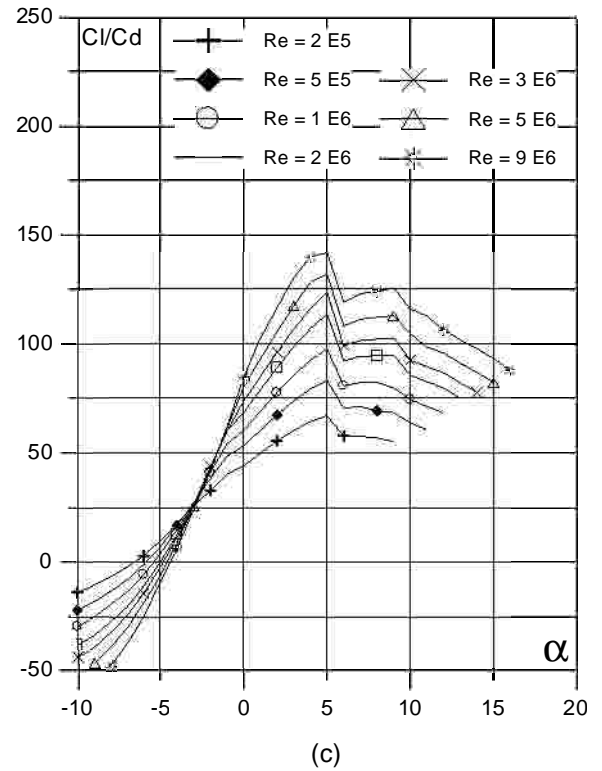
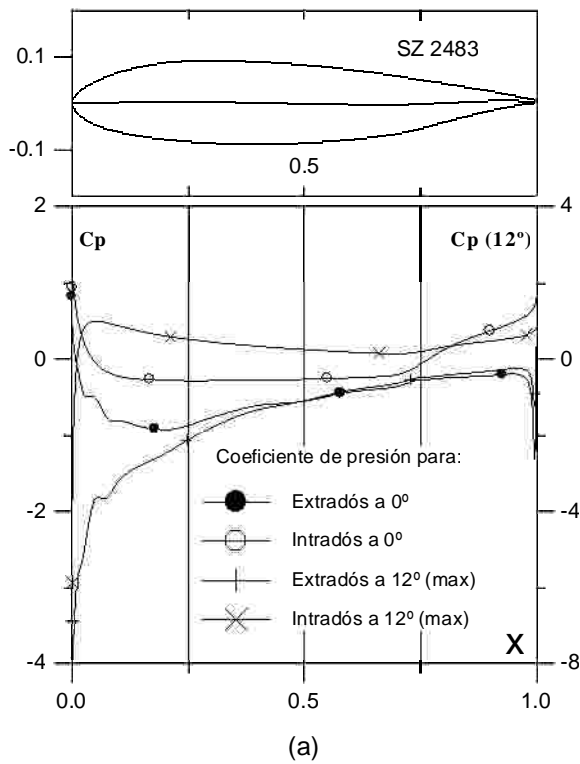


Fig.4.4.15 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2483. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.15 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2483.

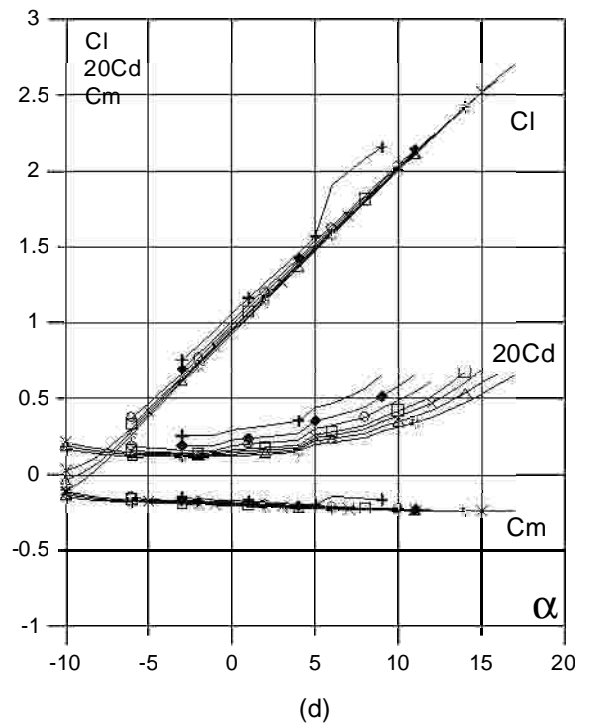
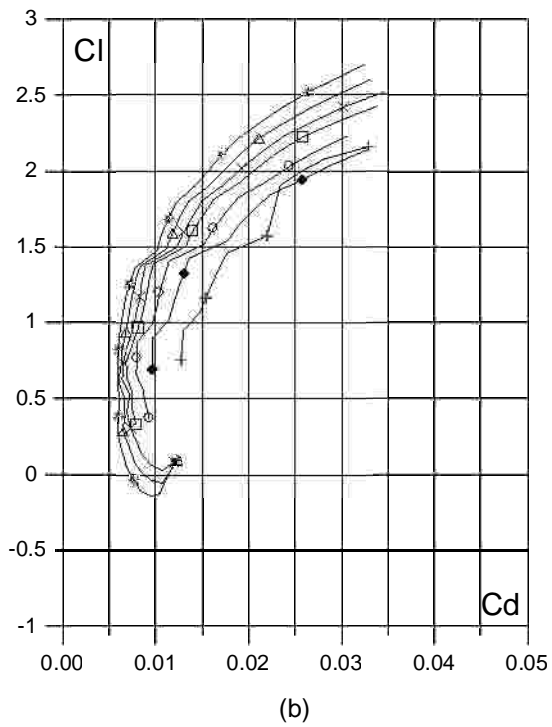
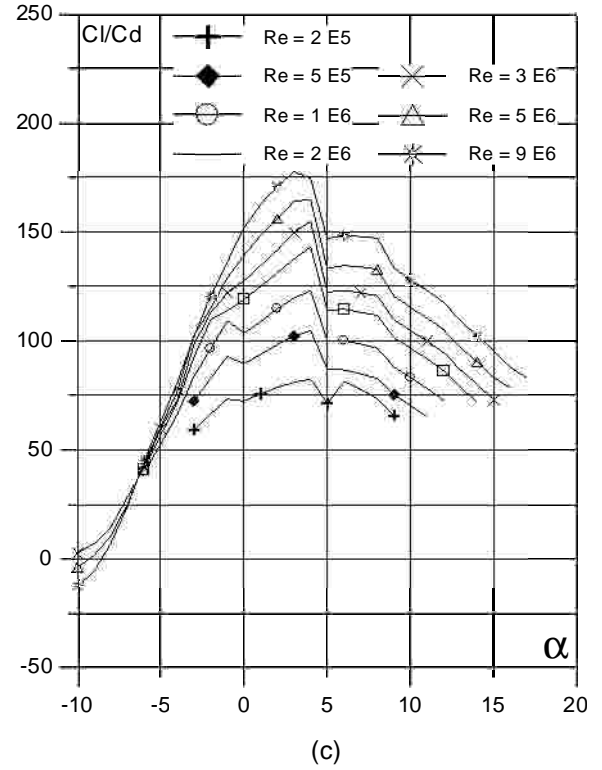
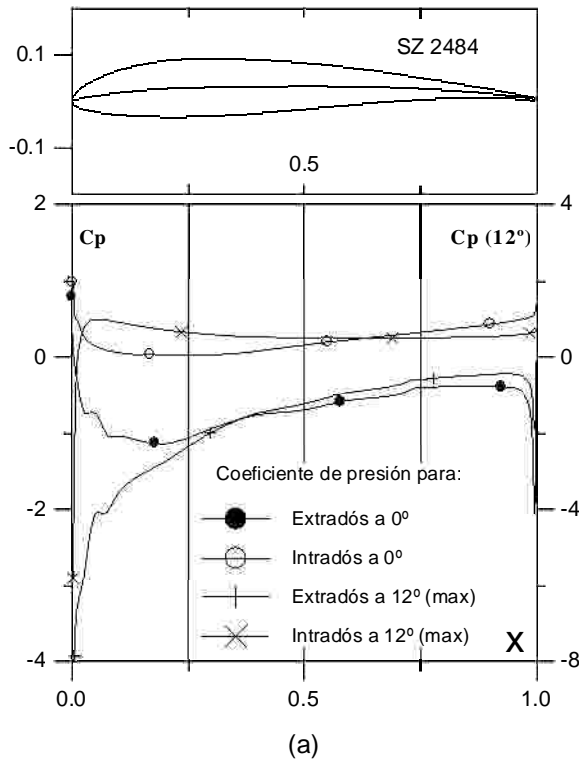


Fig.4.4.16 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2484. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.16 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2484.

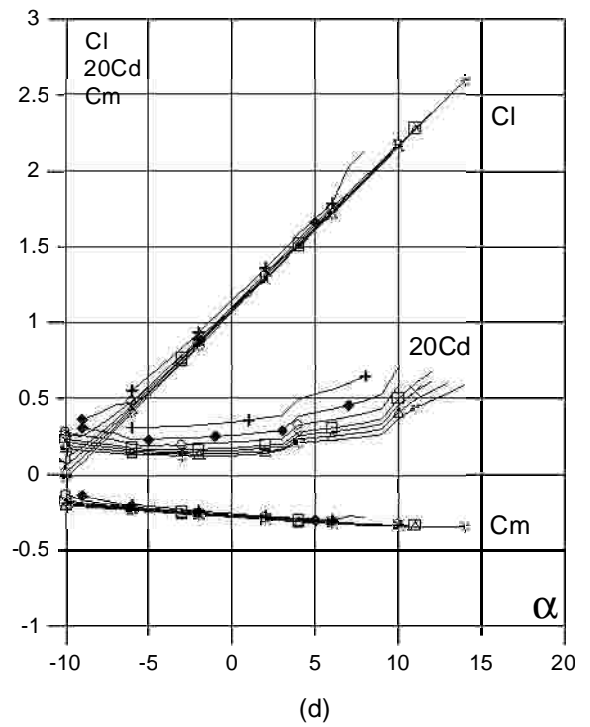
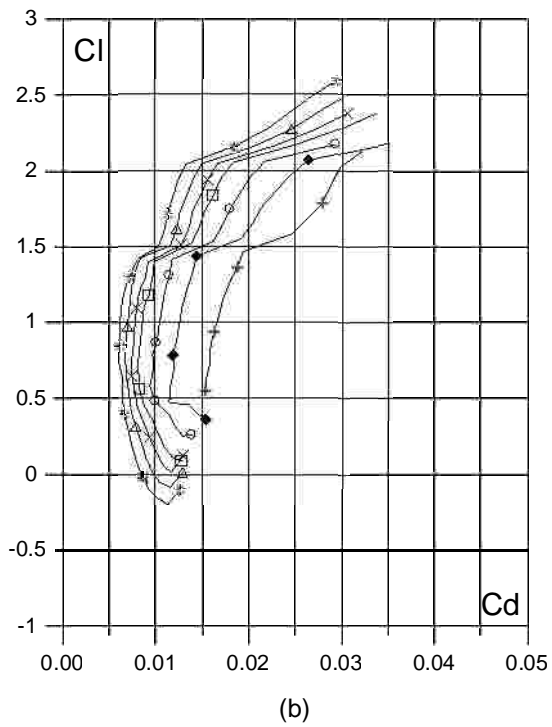
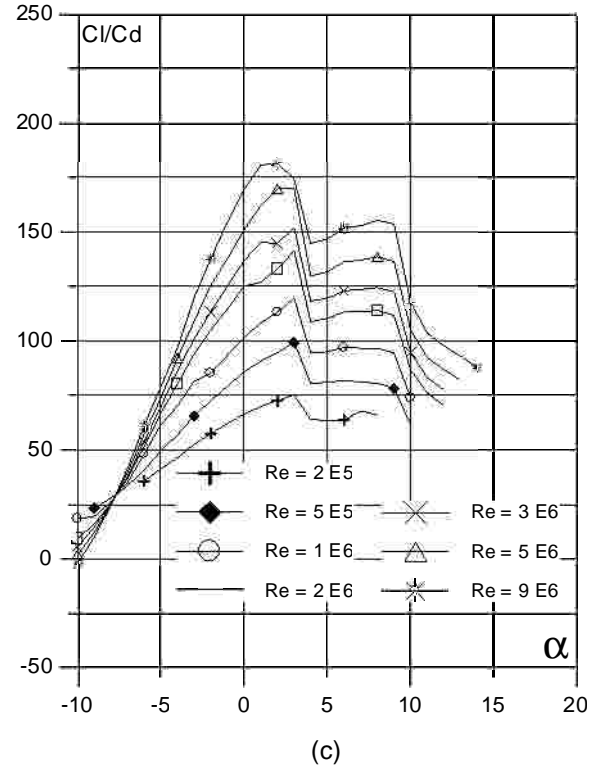
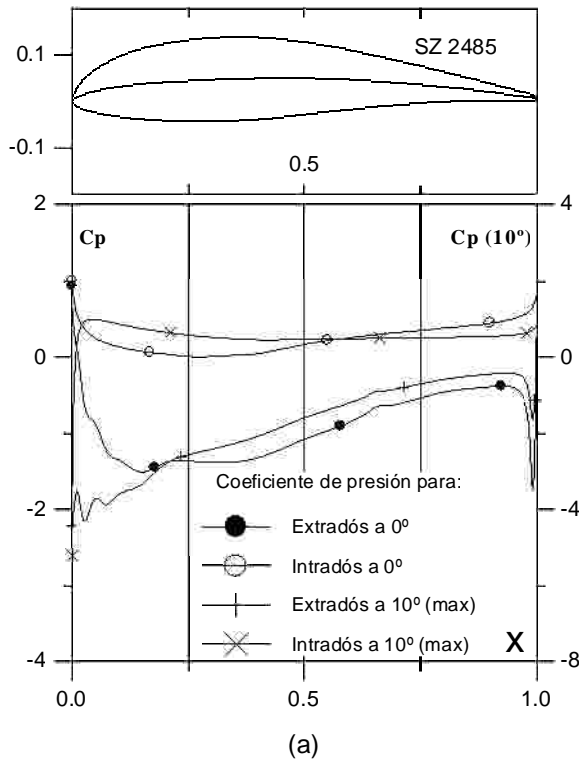


Fig. 4.4.17 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2485. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.17 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2485.

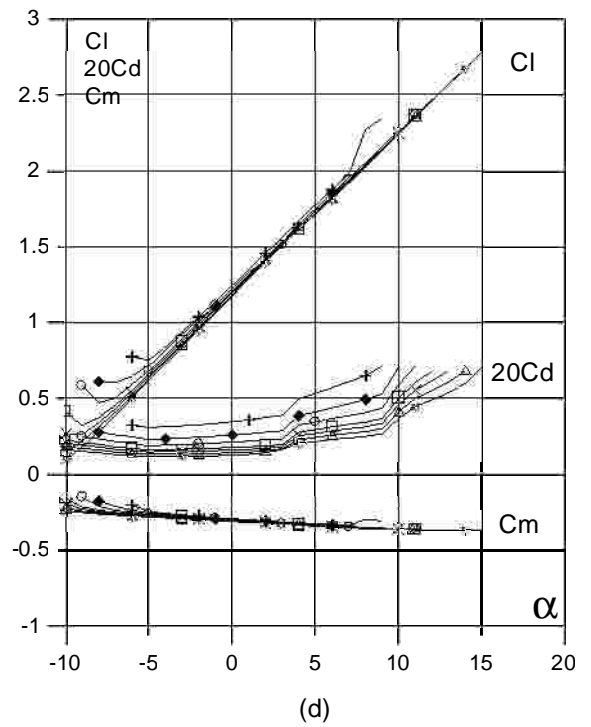
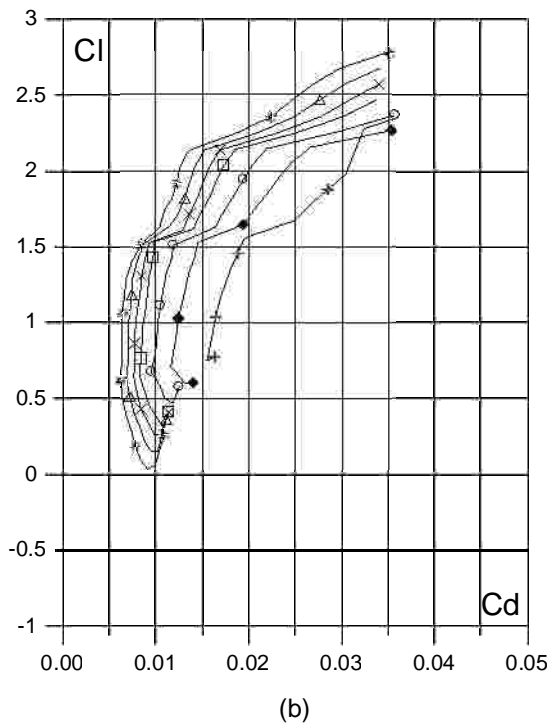
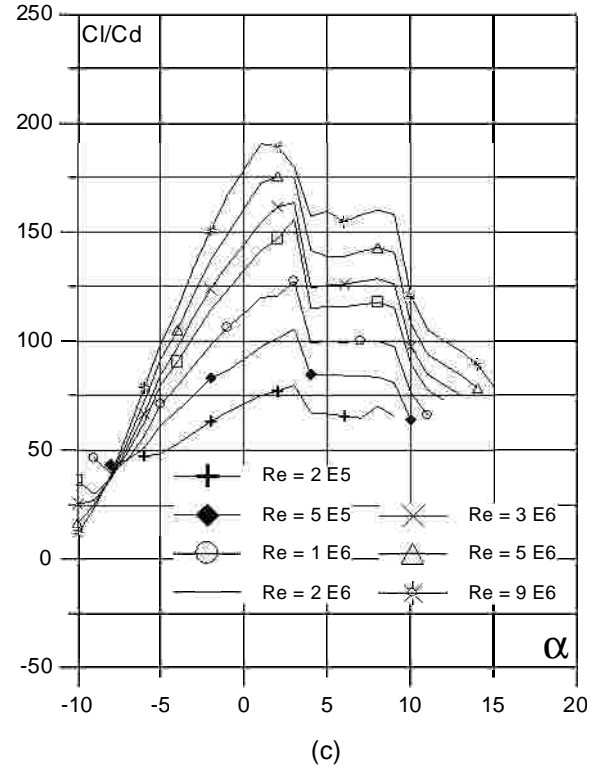
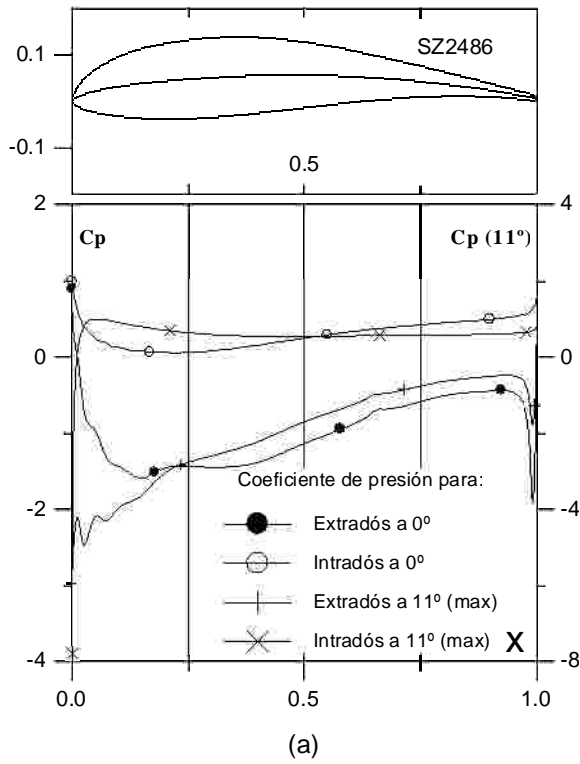


Fig.4.4.18 (a) Cp (0° y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs. X para Re = 1 E6 (leer Cpmax a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2486. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.18 (c) Curvas de Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2486.

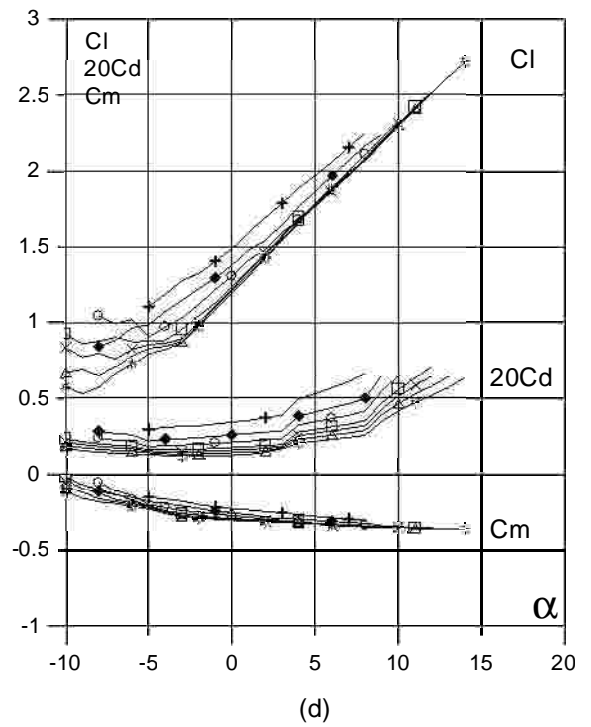
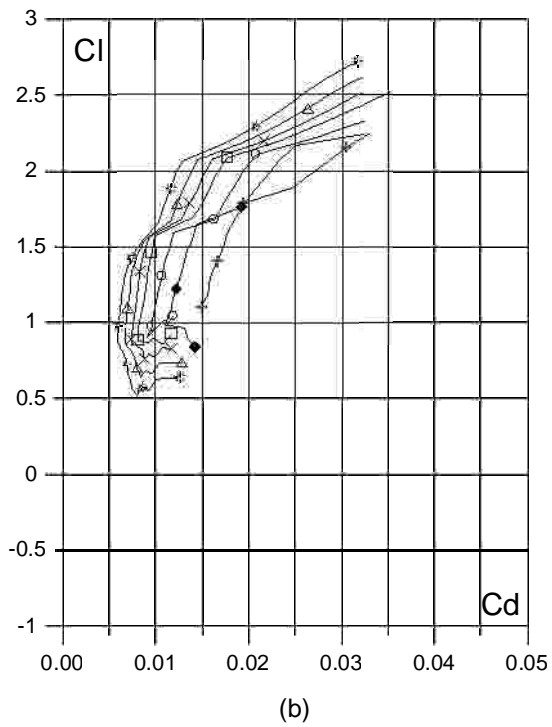
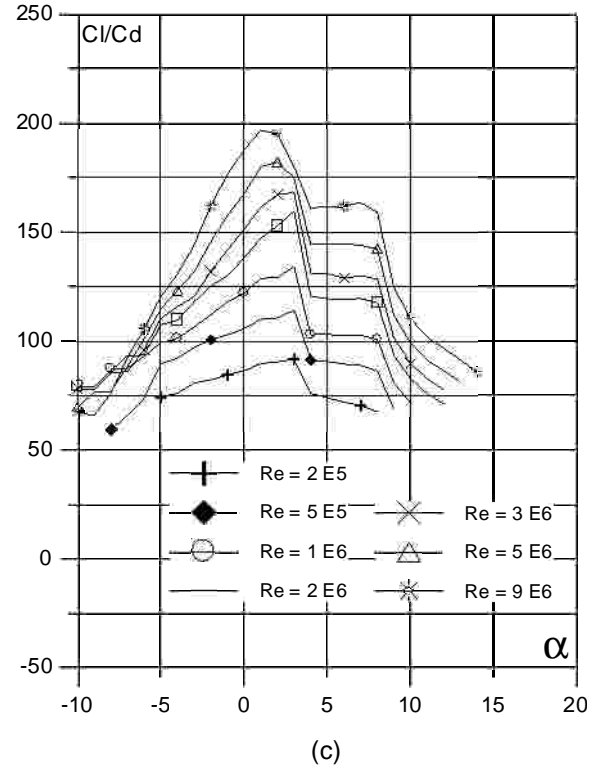
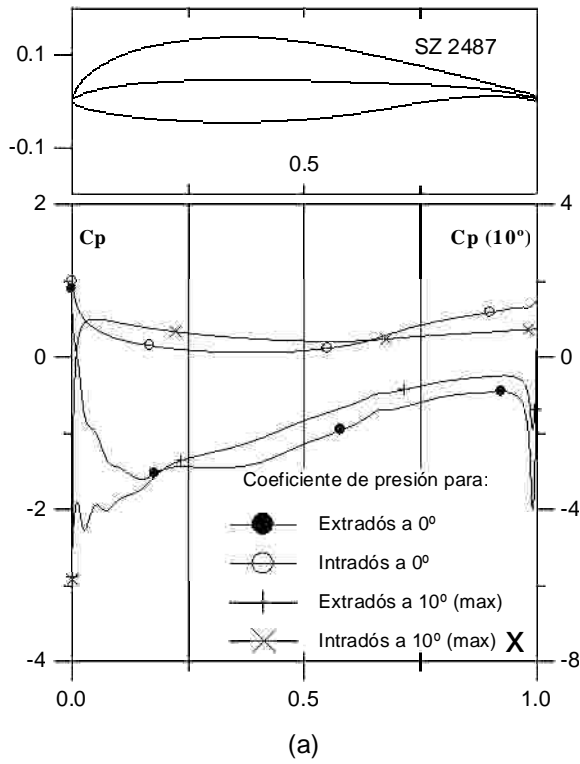


Fig.4.4.19(a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2487. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.19 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2487.

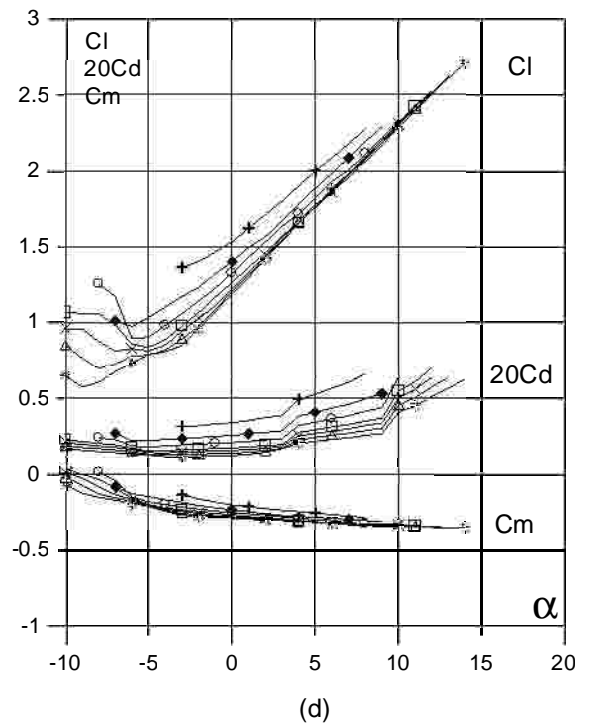
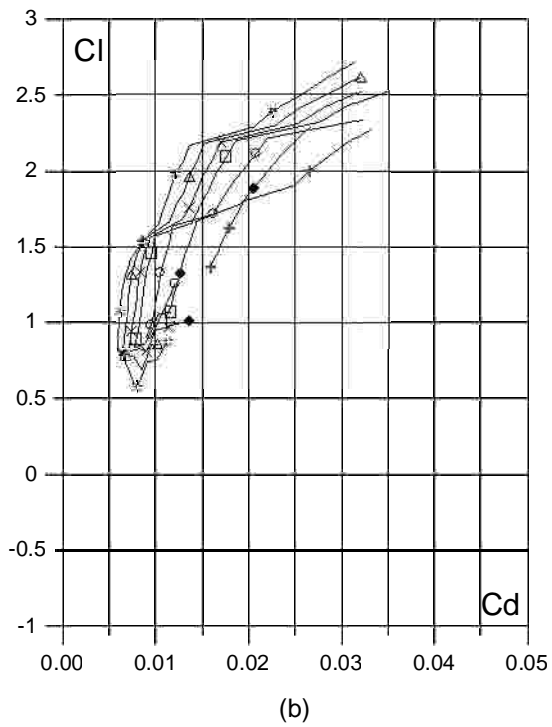
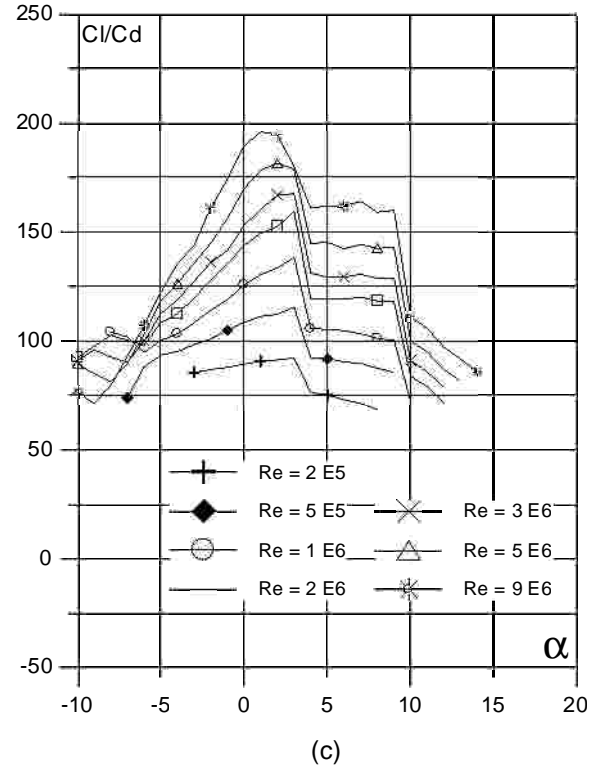
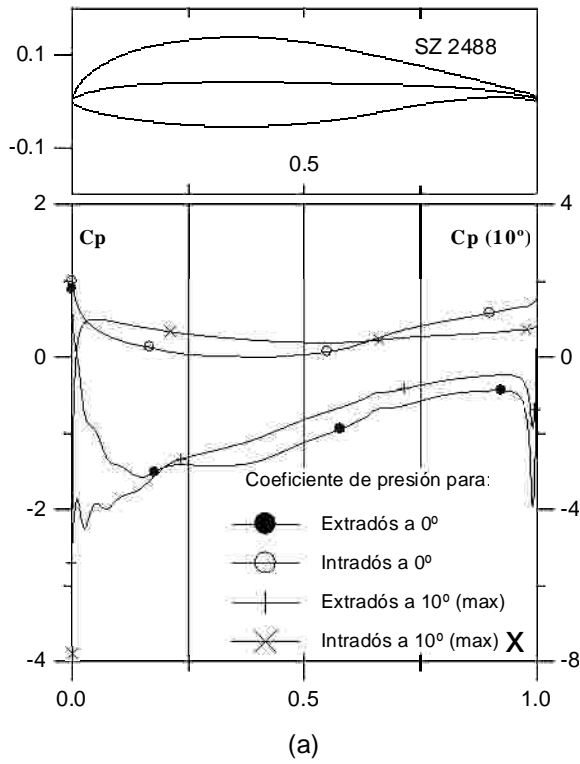


Fig.4.4.20 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E6}$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2488. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.20 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2488.

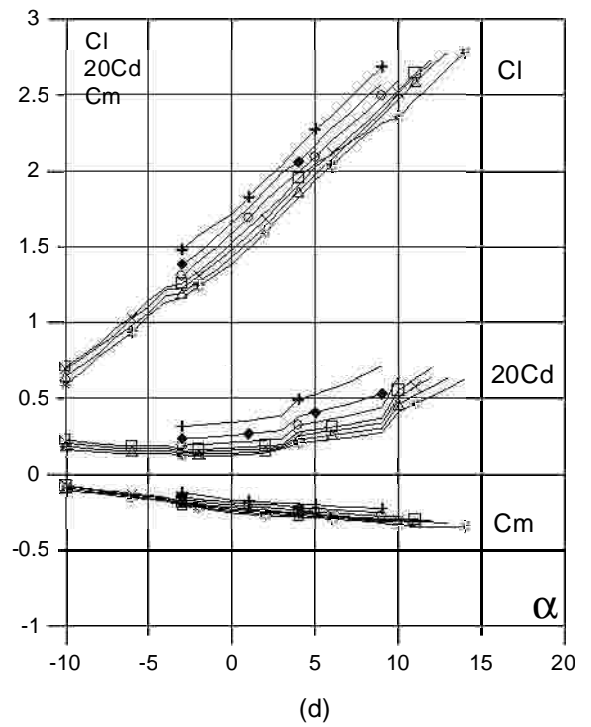
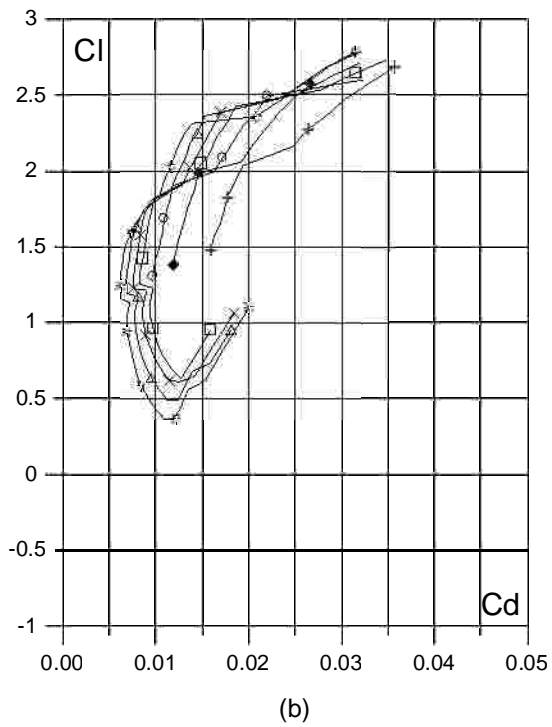
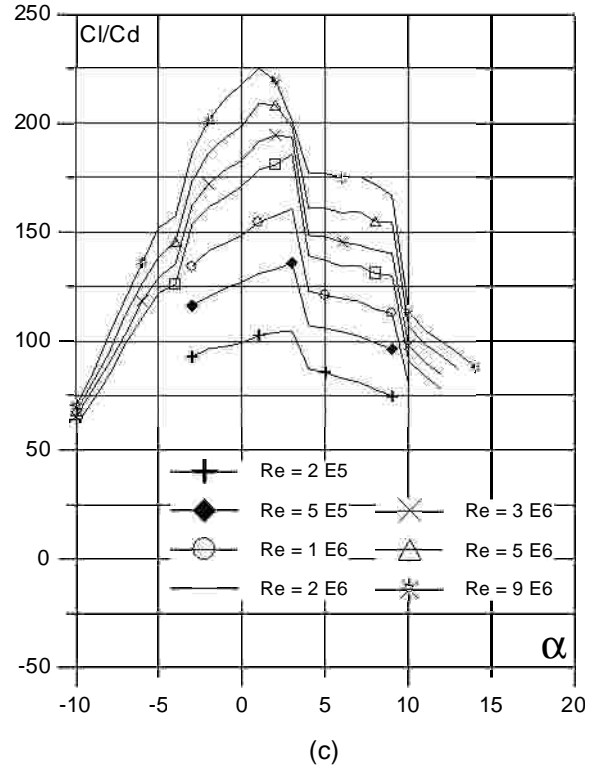
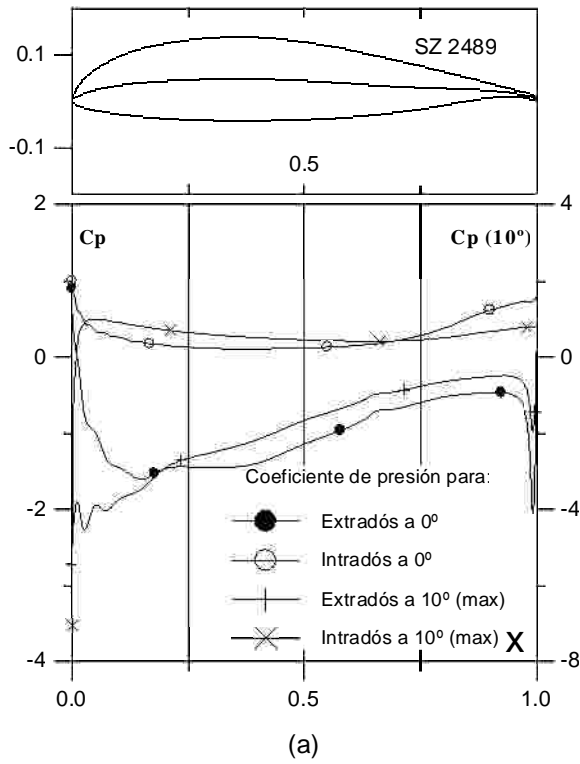


Fig.4.4.21 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2489. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig.4.4.21 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2489.



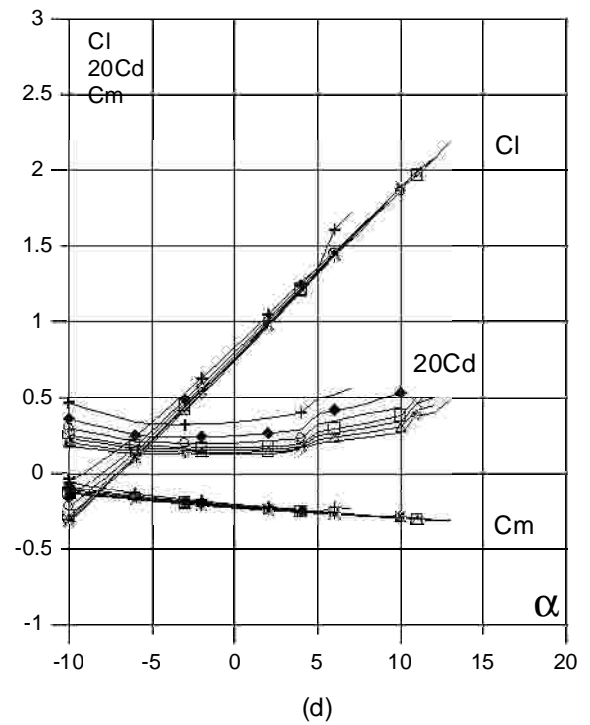
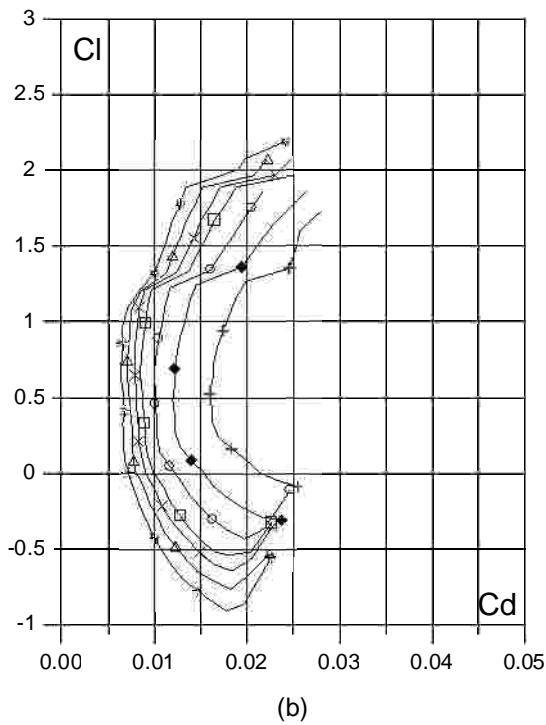
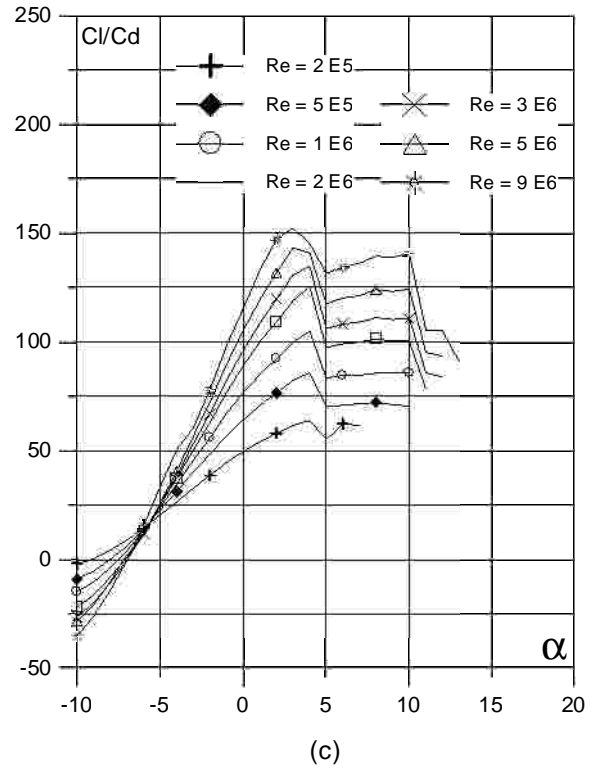
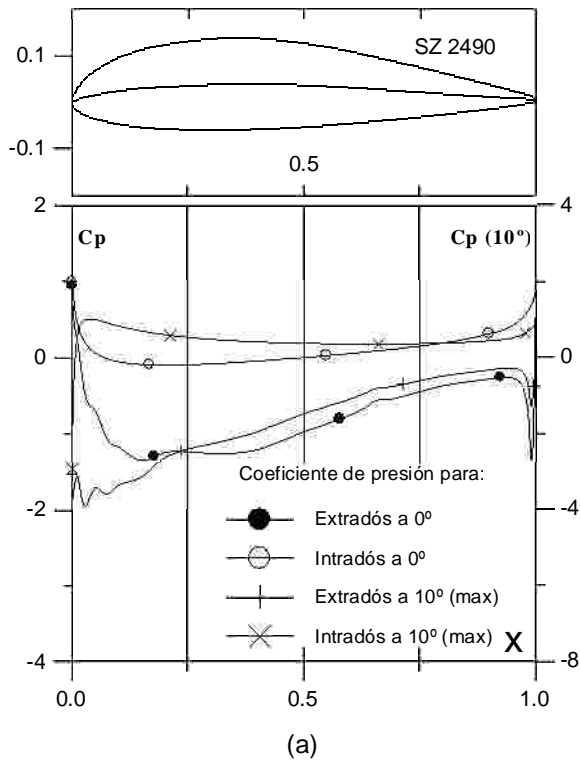


Fig. 4.4.22 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2490. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig. 4.4.22 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2490.

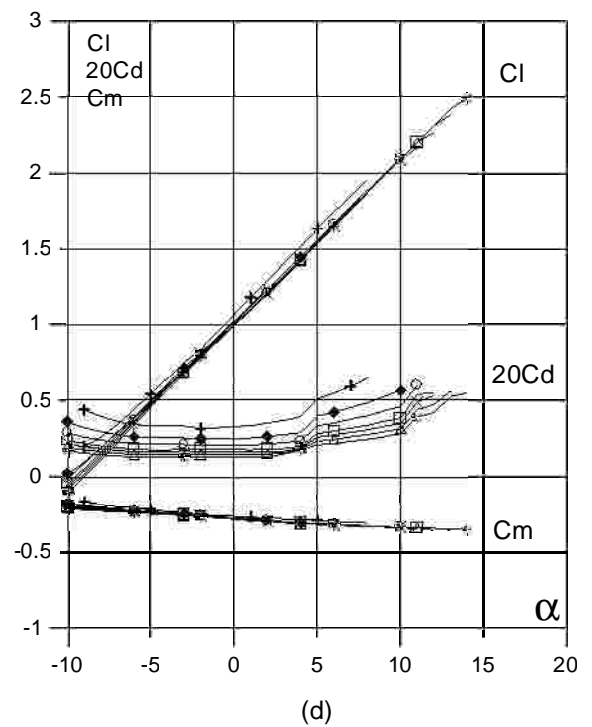
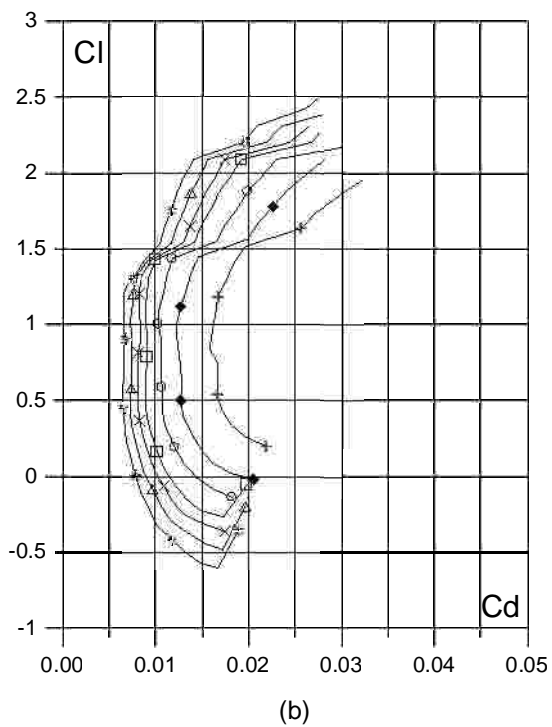
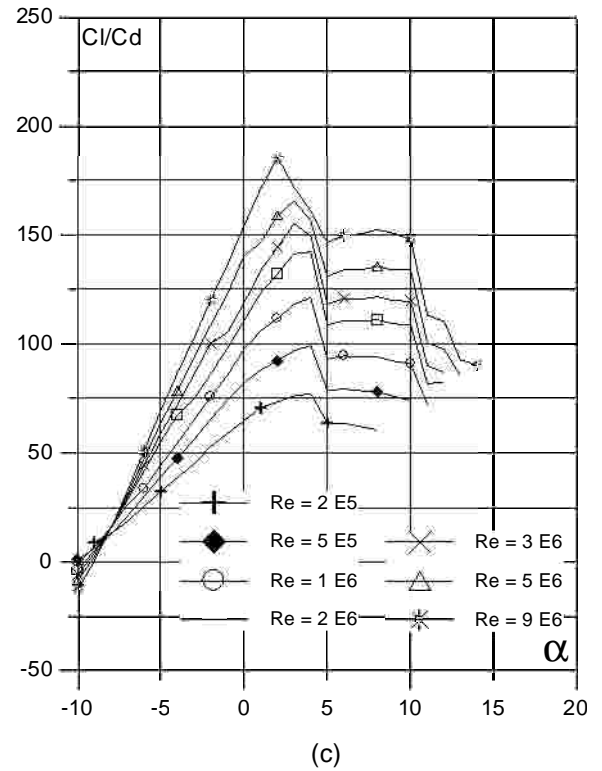
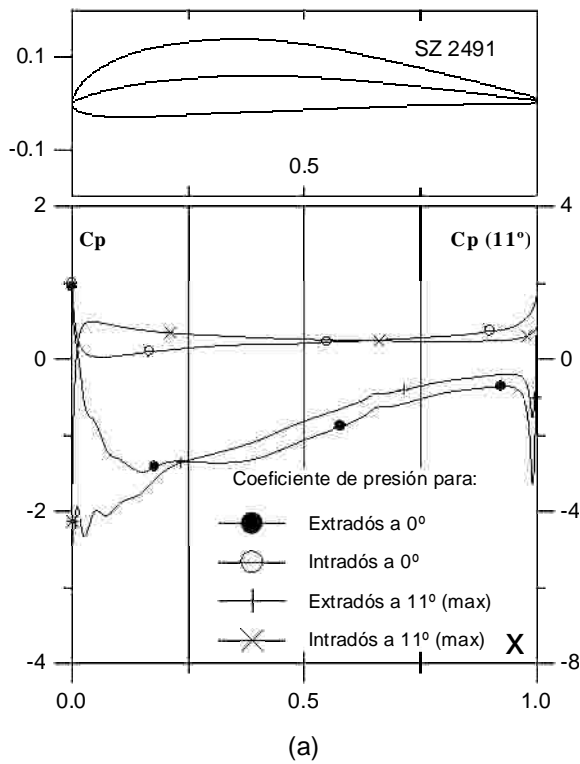


Fig.4.4.23 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2491. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig.4.4.23 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2491.

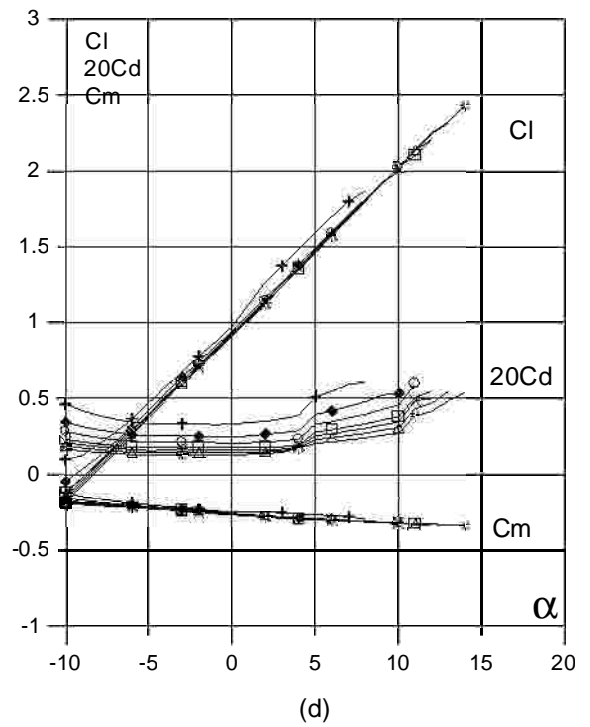
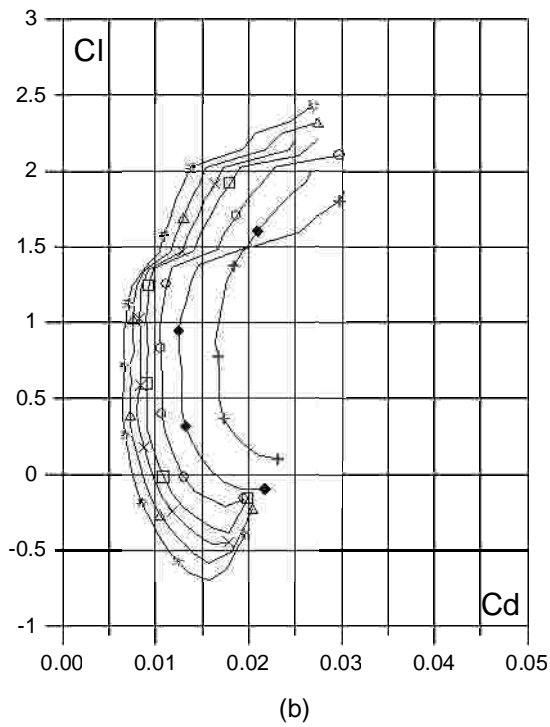
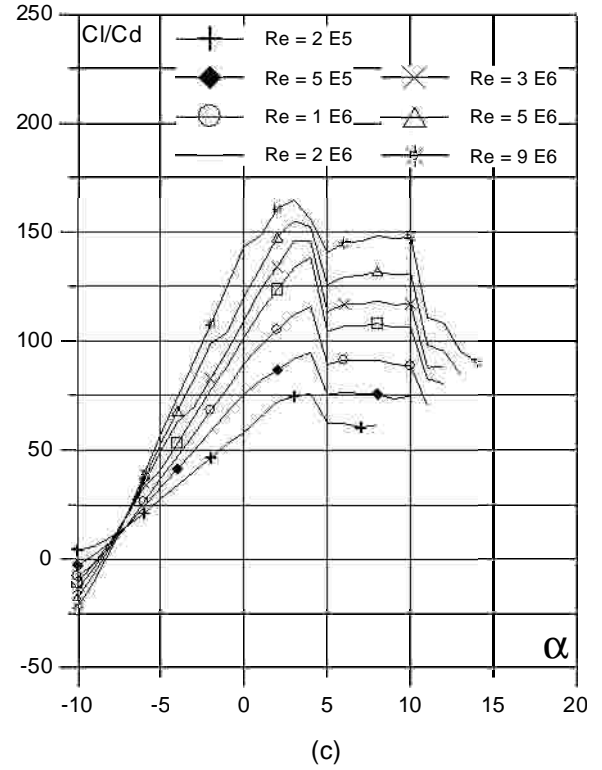
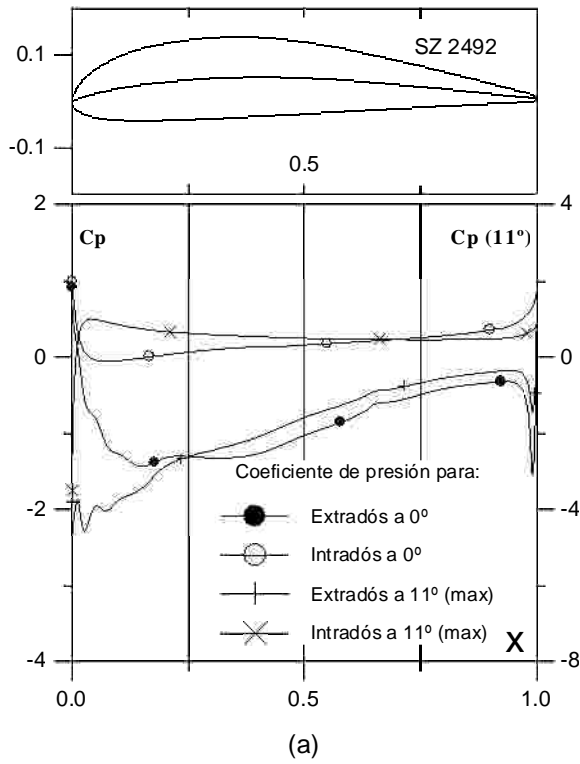


Fig.4.424 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2492. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.24 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2492.

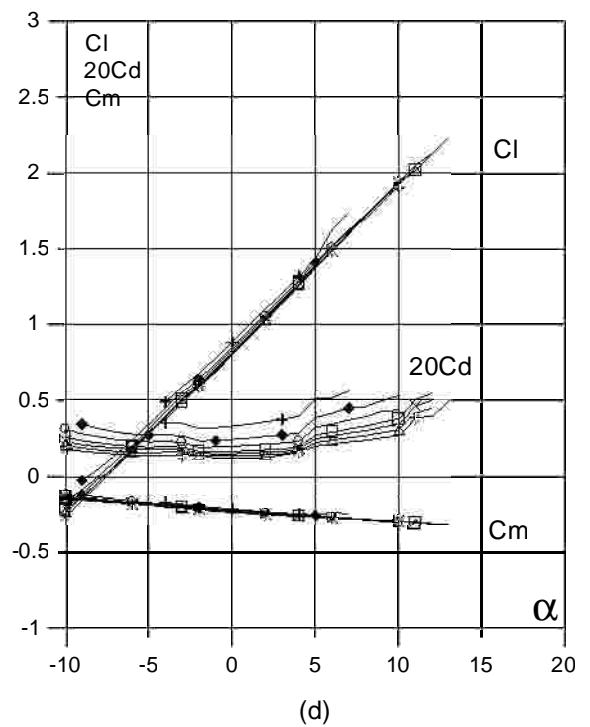
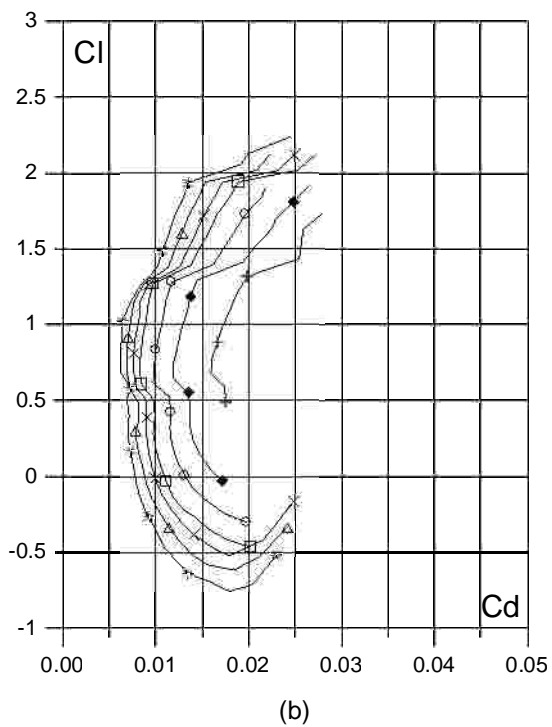
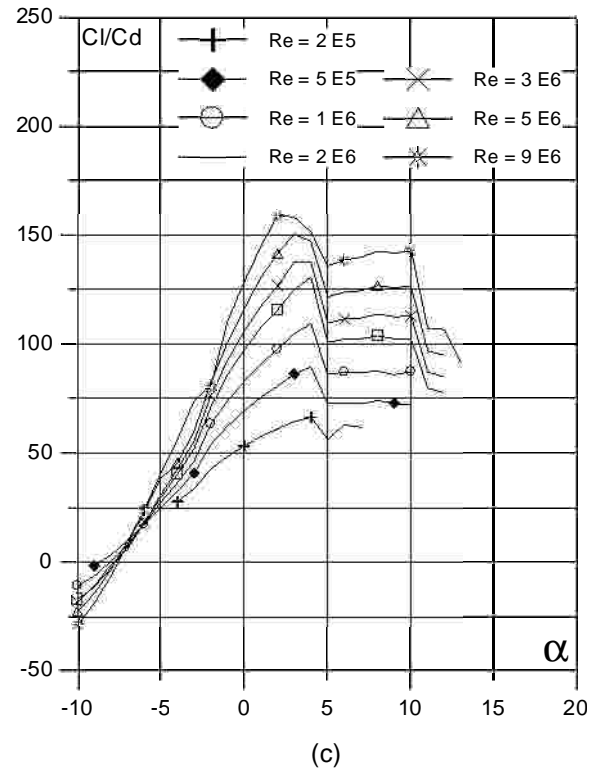
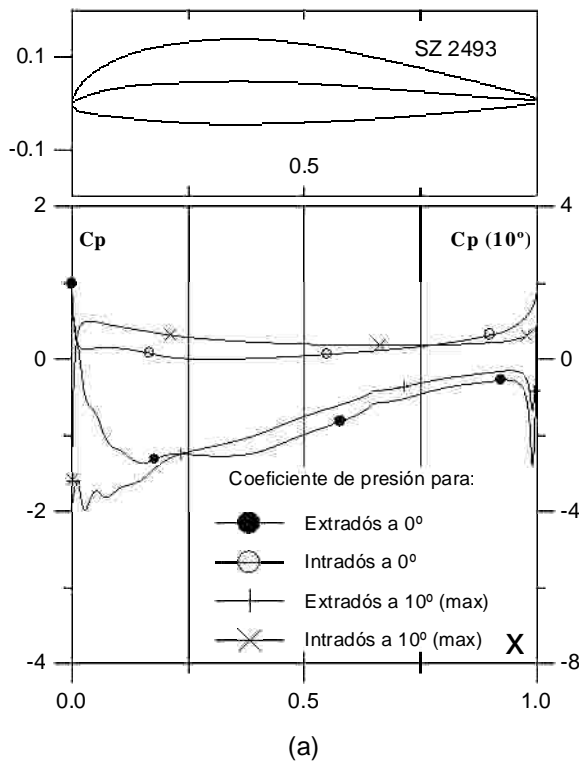


Fig.4.4.25 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2493. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig.4.4.25 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2493.

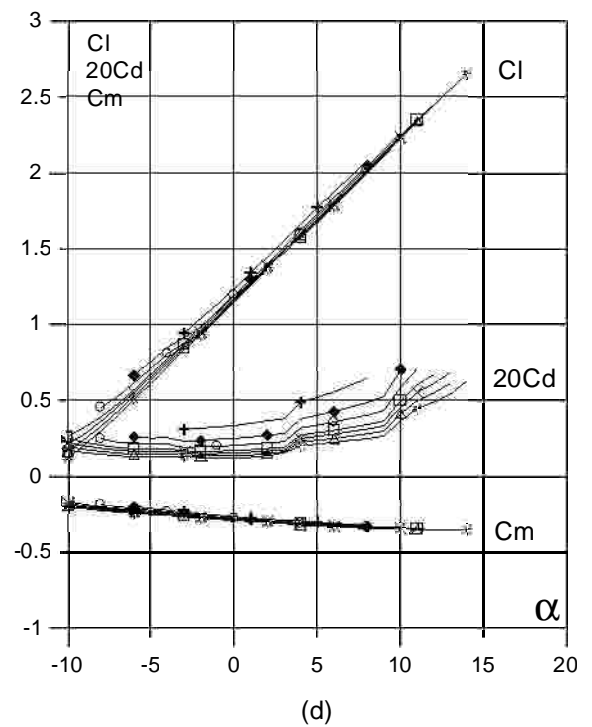
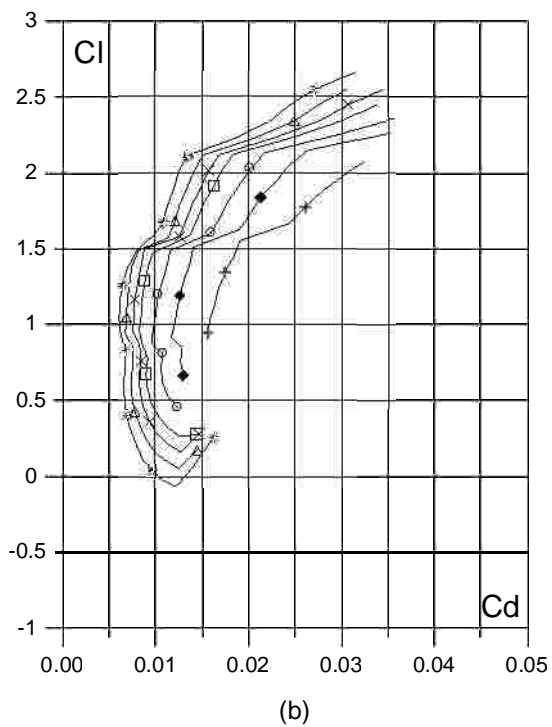
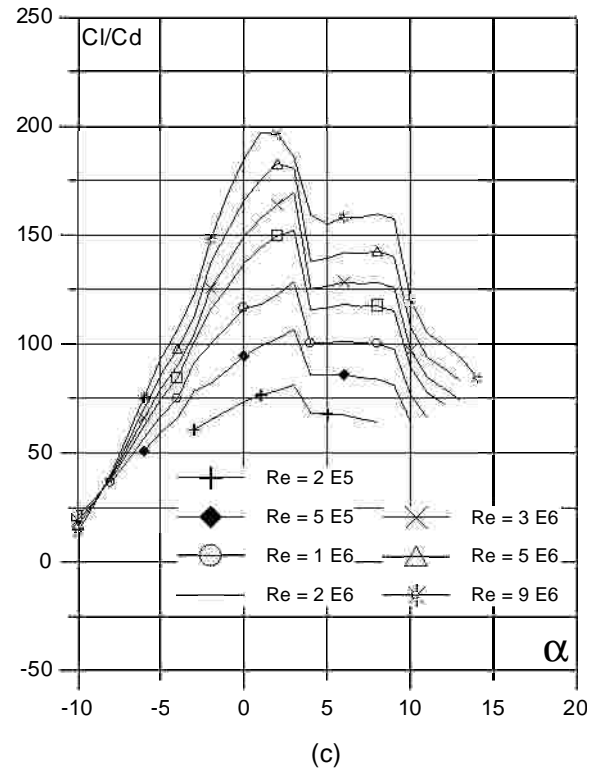
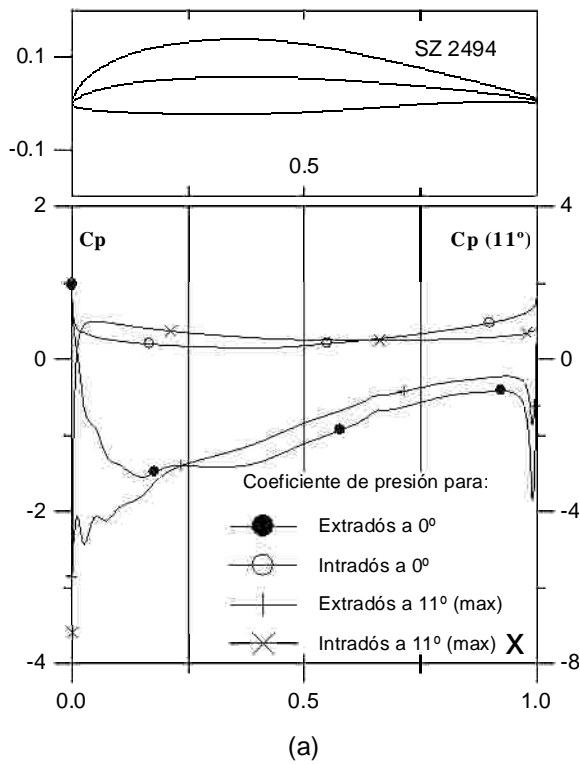


Fig.4.4.26 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 \text{ E}6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2494. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.26 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $C_m$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2494.

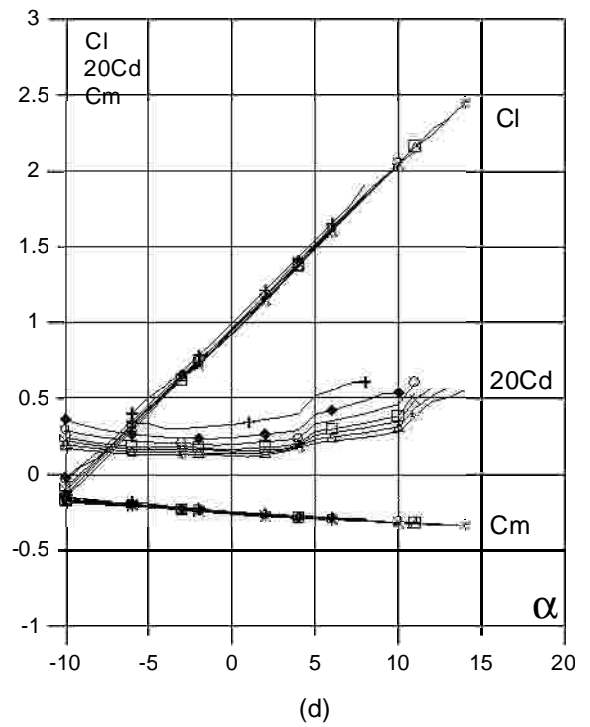
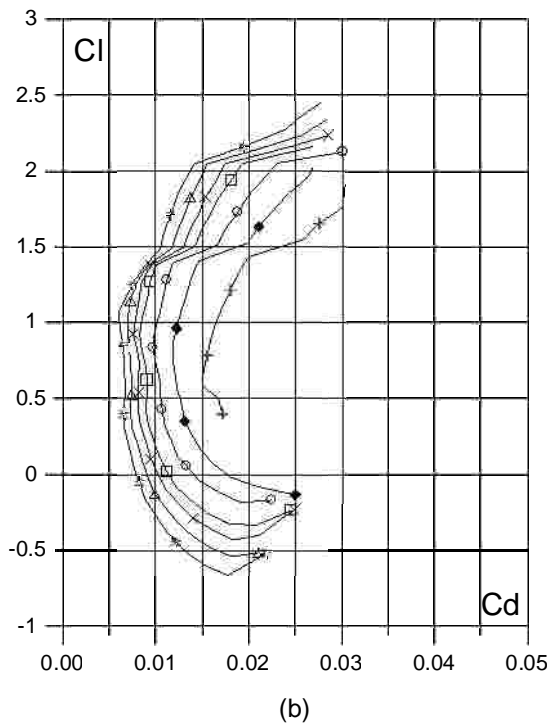
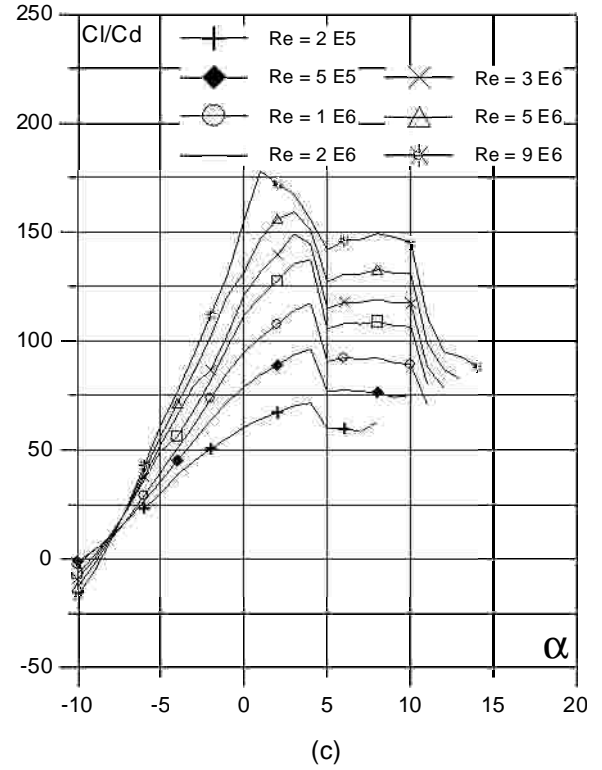
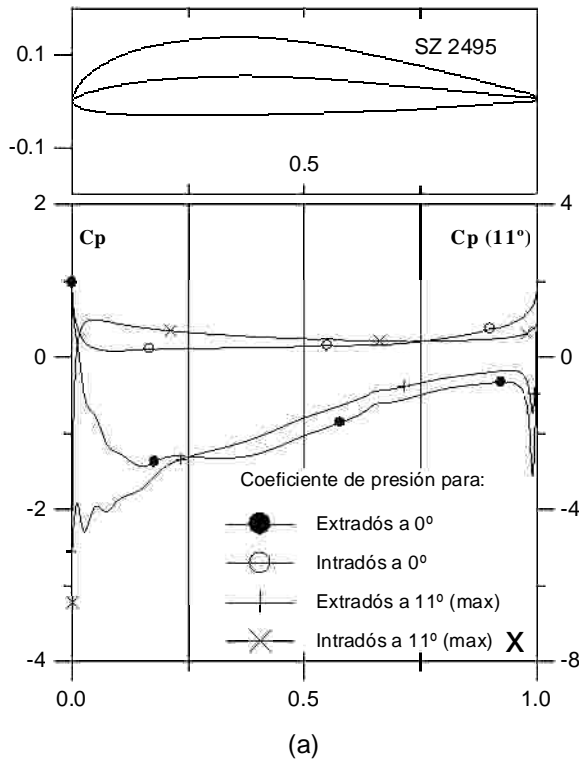


Fig.4.4.27 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2495. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.27 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2495.

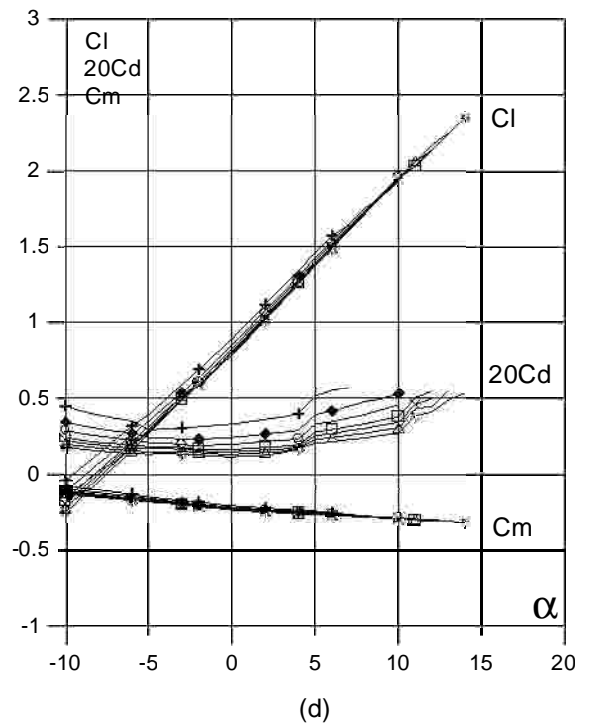
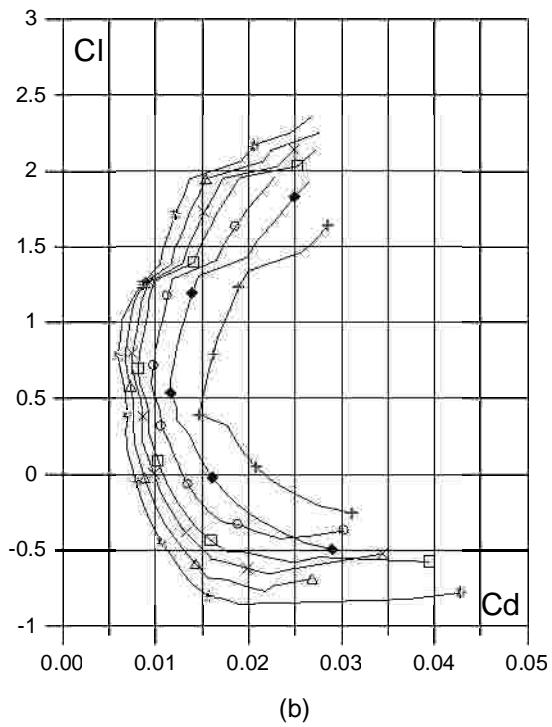
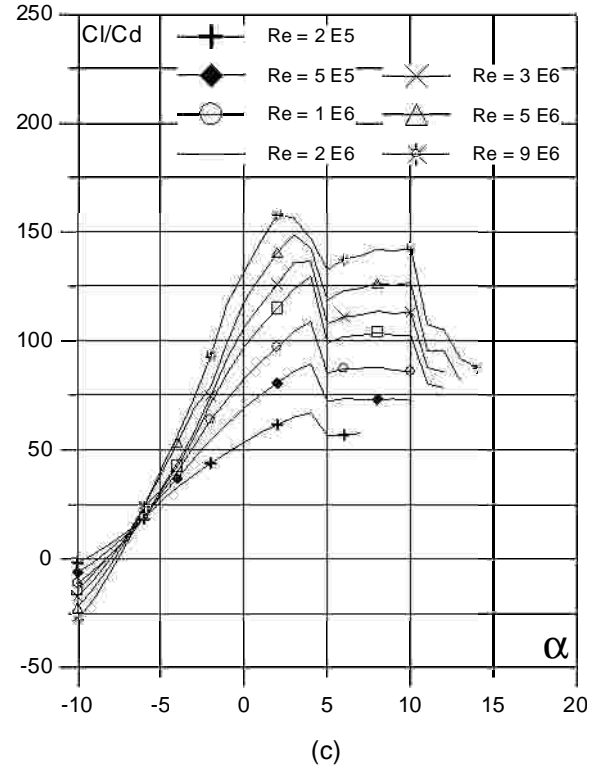
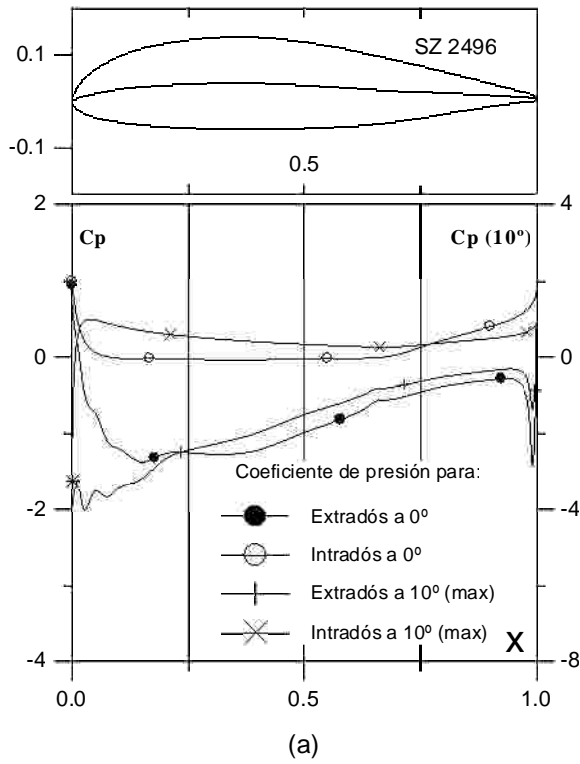


Fig.4.4.28 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2496. Met. Panel y Capa Limite. 220 Puntos.

Fig.4.4.28 (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2496.

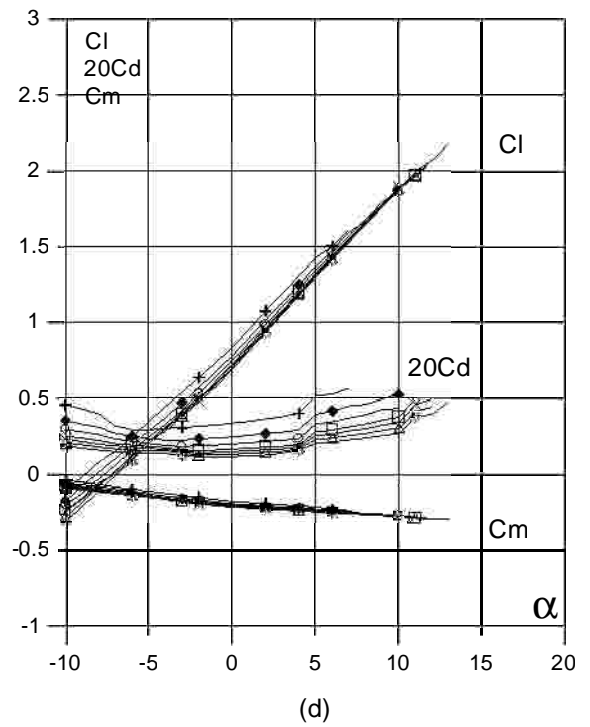
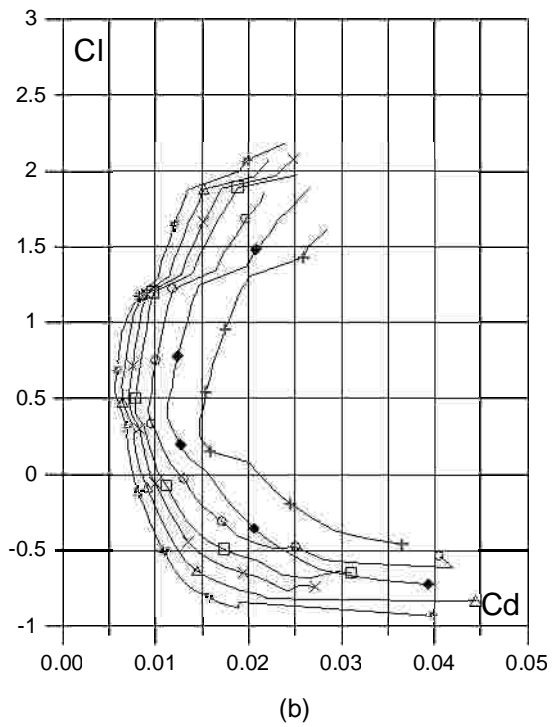
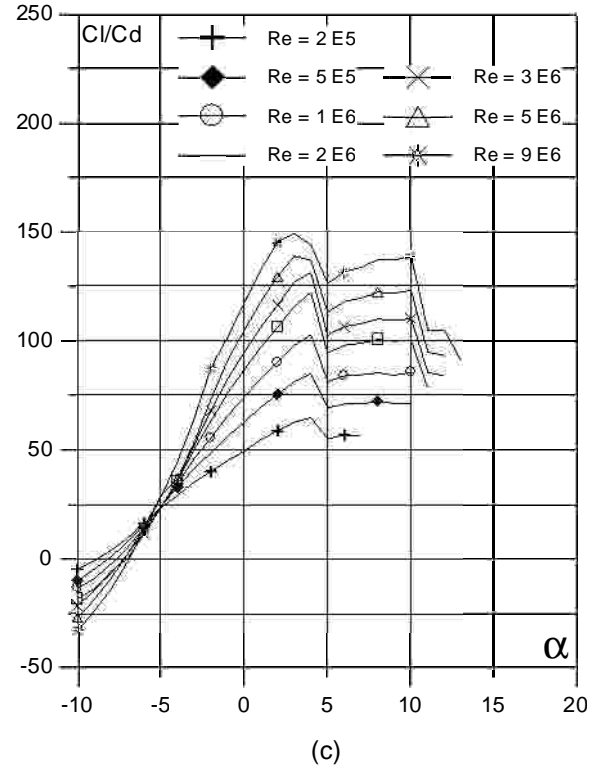
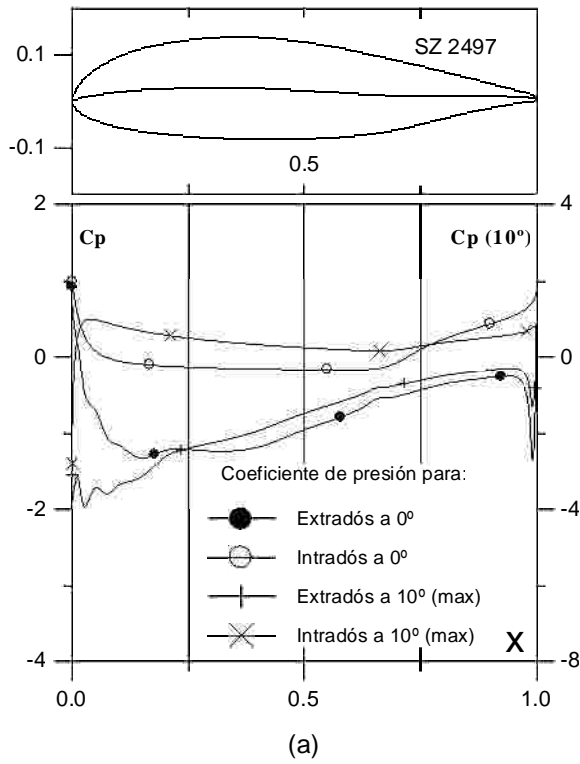


Fig.4.4.29 (a)  $C_p$  ( $0^\circ$  y  $\alpha$  para  $C_{lmax}$ ) vs.  $X$  para  $Re = 1 E6$  (leer  $C_{pmax}$  a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ 2497. Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig.4.4.29. (c) Curvas de  $Cl/Cd$  y (d)  $Cl$ ,  $Cd$  y  $Cm$  vs. Angulo de ataque del perfil SZ 2497.



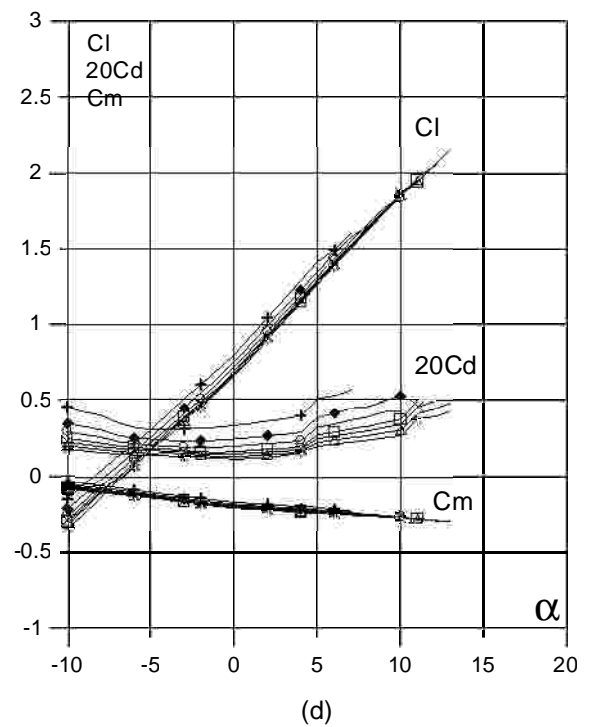
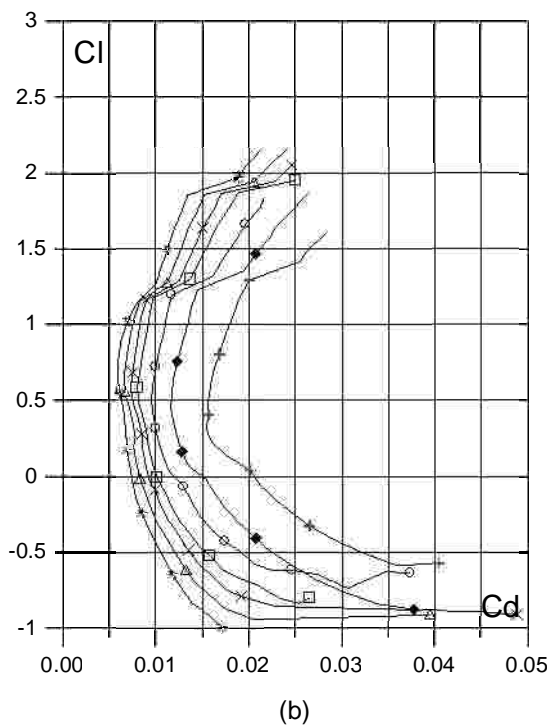
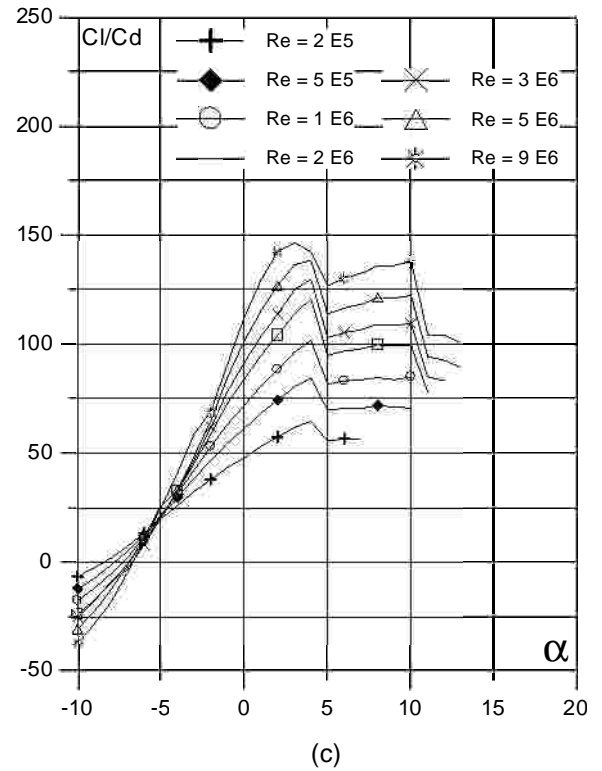
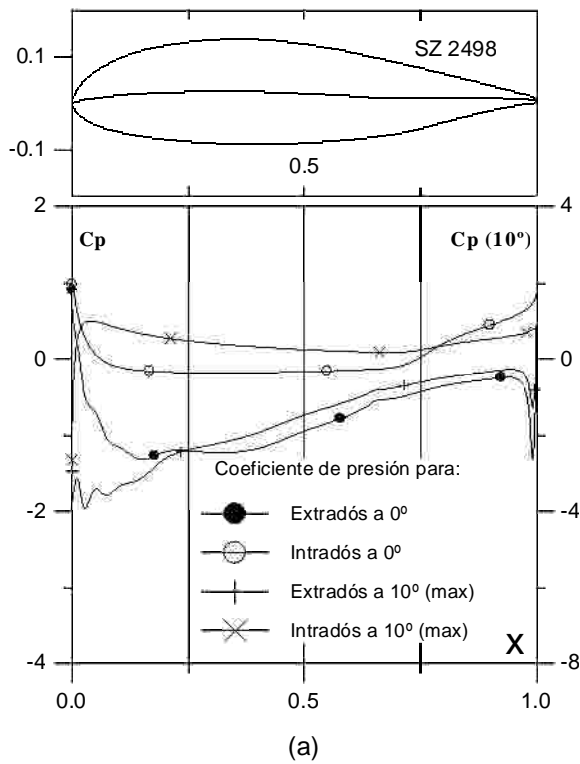


Fig.4.4.30 (a) Cp (0° y  $\alpha$  para C<sub>lmax</sub>) vs. X para Re = 1 E6 (leer C<sub>pmax</sub> a la derecha) y (b) Curvas Polares del perfil SZ- Met. Panel y Capa Límite. 220 Puntos.

Fig.4.4.30 (c) Curvas de Cl/Cd y (d) Cl, Cd y Cm vs. Angulo de ataque del perfil SZ-.

## 5 CAPITULO 5: SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL FLUJO ALREDEDOR DE DOS PERFILES UTILIZANDO EL PROGRAMA ANSYS CFX

En este capítulo estudiaremos el comportamiento aerodinámico de dos perfiles el S4083 y ZAREA4083 respectivamente por medio del código ANSYS CFX v.10 Determinando en forma gráfica la distribución de velocidad, presión y líneas de corriente alrededor del perfil, la magnitud de la presión sobre el contorno del perfil así el cálculo de los coeficientes de arrastre y sustentación.

La primera parte de este capítulo ofrece un enfoque general sobre la estructura del programa ANSYS CFX, nombra el método fundamental de cálculos que utiliza, y las funciones y alcances del mismo, para la redacción de este texto se utilizó el manual de usuario del programa y la tesis del Ing. Miguel Baritto y las clases impartidas el Profesor Julio Segura.

La segunda parte del Capítulo se encuentra dedicada a la metodología de trabajo seguida para la realización de esta labor. El programa ANSYS CFX se encuentra estructurado de tal manera que hace necesario el cumplimiento de las siguientes 5 tareas fundamentales:

- Diseño de la geometría utilizada.
- Diseño y generación de la malla.
- Pre-procesamiento.
- Solver.
- Post-procesamiento.

Cada una de estas tareas será explicada con mayor detalle en el capítulo 5.

En la tercera parte de este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para ambos perfiles en forma de tablas e imágenes.

Finalmente se muestran comentarios pertinentes a la comparación entre los resultados del perfil base y modificado.

### 5.1. Nociones Básicas

El conjunto de expresiones matemáticas que describen los procesos de momentum, transferencia de calor y masa son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes. Este agregado de ecuaciones diferenciales parciales que fueron obtenidas a principios de siglo XIX no tienen una solución general analítica, pero pueden discretizadas y resueltas por métodos numéricos.

Otros procesos, como el de la combustión, pueden ser descritos con otras ecuaciones que se resuelven en conjunto con las de Navier-Stokes. A menudo es utilizado un modelo aproximado para generar estas ecuaciones adicionales. Un claro ejemplo de esto son los modelos de turbulencia.

Existen diferentes métodos de solución en los códigos CFD. El más común es el conocido como método de volúmenes finitos en el cual está basado el software ANSYS CFX.

El método de volúmenes finitos consiste en dividir la región de interés en pequeñas sub-regiones, llamadas volúmenes de control. Las ecuaciones son discretizadas y resueltas de forma iterativa para cada elemento de volumen finito, obteniéndose como resultado un valor aproximado de cada variable en cualquier lugar del dominio. De este modo, se puede obtener una imagen del comportamiento del flujo dentro de la región estudiada.

### 5.1.1. Estructura del Software ANSYS CFX

ANSYS CFX consta de cinco módulos de software que pasan la información requerida para realizar un análisis CFD:

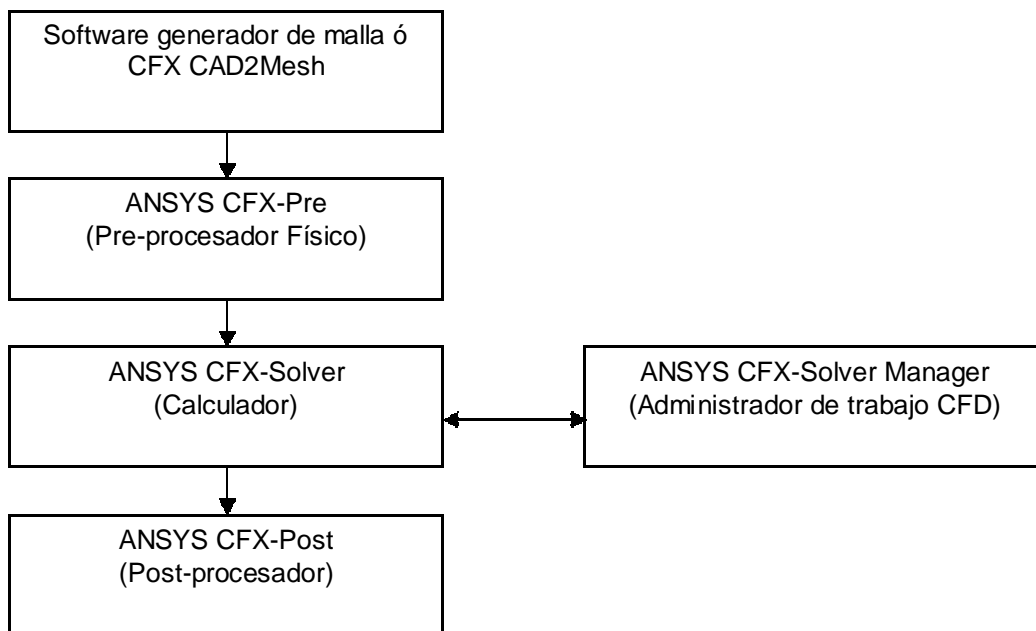


Fig. 5.1.1.- Estructura del software ANSYS CFX.

- Software generador de malla ó CFX CAD2Mesh: Es el módulo de software encargado de generar una malla de acuerdo a una geometría (la de volumen de control) siguiendo ciertos parámetros que pueden ser establecidos por el usuario, tales como,

forma, tamaño, separación, orientación, factores de expansión, entre otros, de los elementos de volumen finito.

- Pre-procesador físico: ANSYS CFX-Pre permite la importación de diferentes tipos de malla con el fin de que las mallas que se adapten a las geometrías más complejas puedan ser procesadas. En este modulo el usuario selecciona aspectos físicos del flujo, las condiciones de borde, valores iniciales y parámetros de cálculo.
- Calculador: ANSYS CFX-Solver resuelve todas las variables de solución para la simulación del caso de estudio de acuerdo a las especificaciones establecidas en el pre-procesador físico.
- Administrador de trabajo CFD: ANSYS CFX-Solver Manager provee un mayor control para el manejo de las tareas CFD. Sus funciones mas importantes son:
  - Especificación de los archivos de entrada del ANSYS CFX-Solver.
  - Iniciar y detener el calculador.
  - Monitoreo del proceso iterativo.
  - Configuración del calculador para cálculos en paralelo.
- Post-procesador: ANSYS CFX-Post provee a través de una interfaz gráfica herramientas para analizar y presentar los resultados de la simulación. Las características más importantes incluidas en este módulo son:
  - Post procesamiento cuantitativo.
  - Generación de reportes.
  - Líneas de comando y estado de los archivos de entrada.
  - Variables definidas por el usuario.
  - Generación de una variedad de gráficos donde la visibilidad, transparencia y precisión de las líneas pueden ser controlada por el usuario.

## 5.2. Metodología de Trabajo y Parámetros Establecidos

La metodología seguida para simular el flujo alrededor de los perfiles seleccionados consta de 5 pasos fundamentales que serán desarrollados a continuación en el orden de aplicación:

### Diseño de la geometría utilizada

Antes de generar la malla es necesario crear una geometría sólida y cerrada. Esta puede ser creada utilizando el software modelador de geometría de ANSYS (desing modeller), o cualquier otro programa de dibujo asistido por computadora que permita generar sólidos.

La geometría sólida debe representar el espacio que ocupara el fluido en el proceso a simular. Por ejemplo, si se desea evaluar el flujo dentro de una tubería de sección circular, la geometría creada debería ser un cilindro macizo de diámetro igual al interno del conducto.

En este caso se desea simular el flujo alrededor de un perfil aerodinámico, por lo tanto, la geometría creada para esta situación está representada por una placa plana rectangular de muy poco espesor (debido a que se simulara un problema en 2D) agujereada con la forma del contorno del perfil. Las dimensiones empleadas para la lámina delgada var desde un valor mínimo de 15000mm x 7000mm x 10mm donde el contorno del perfil (orificio) está situado aproximadamente en el centro, hasta valores de 35000mm x 7000mm x 10mm ubicando con el perfil en el mismo punto, es decir, prolongando en 20000mm el de control después del borde de fuga. La razón de esta variación en la geometría se debe a que para las simulaciones con alto valor de ángulo de ataque y Numero de Reynolds es necesaria una mayor extensión del dominio aguas abajo del perfil para lograr que la perturbación del flujo generada por el mismo se disipe completamente antes de llegar a la salida.

El contorno del perfil fue trazado basándose en la longitud de la cuerda fuera de 1000mm. Para cada ángulo de ataque evaluado fue necesaria la generación de un nuevo sólido, con el fin de que la misma cumpliera con las condiciones necesarias para la simulación.

Todos estos modelos fueron diseñados y generados con el software de dibujo AutoCAD 2007.

## Diseño y generación de la malla

En esta etapa se utilizó el módulo CFX-Mesh incluido en el software ANSYS CFX, el cual genera mallas con elementos no estructurados.

Después de importar la geometría del volumen de control al generador de malla, se definieron 6 regiones correspondientes a las siete superficies que los definen, como se indica en la figura 5.2.1.

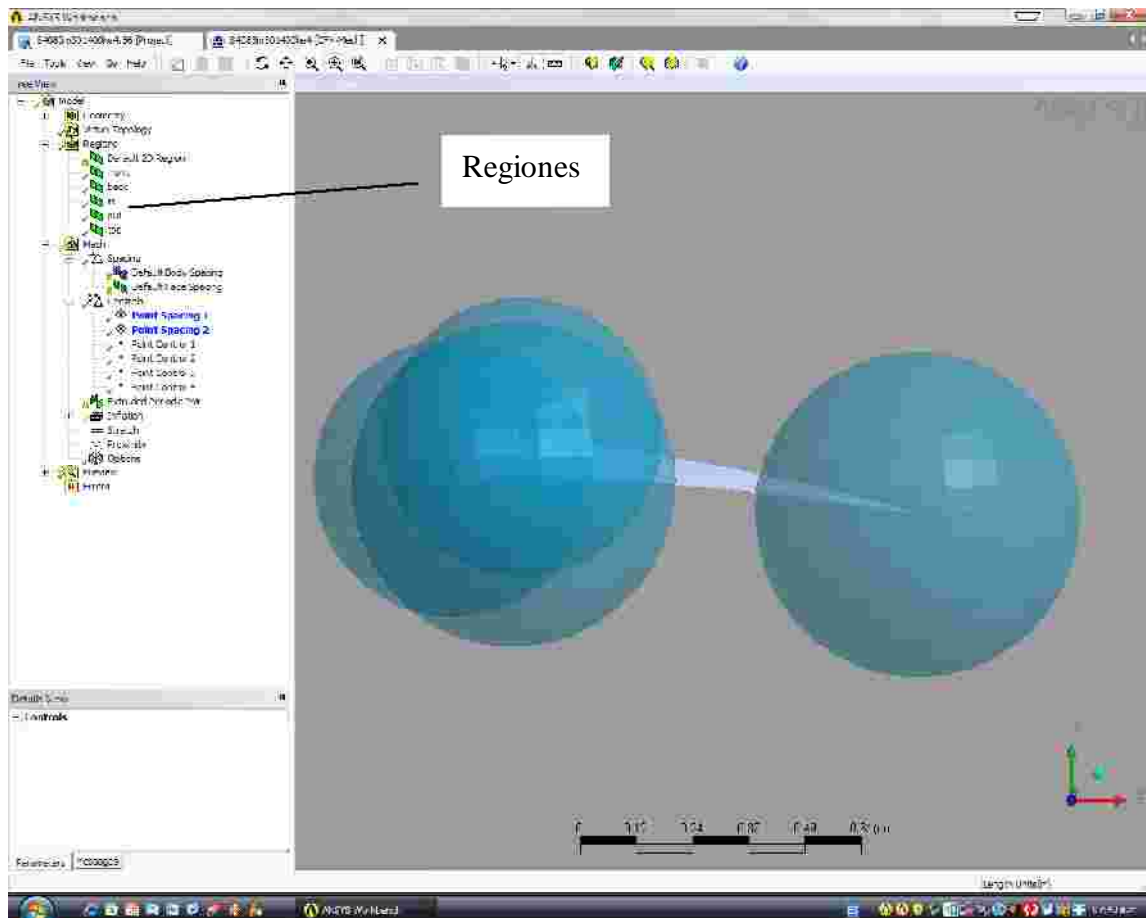


Fig. 5.2.1.- Definición de regiones y puntos de control

A continuación se enumeran ciertos parámetros de diseño que debieron ser aplicados con el fin de obtener una malla de superficie más refinada alrededor de la superficie del perfil:

- Puntos de control: Es un parámetro que limita el tamaño de los elementos de volumen finito que se encuentran dentro del radio con respecto a un punto ubicado por el usuario. En la malla generada se establecieron 4 puntos de control distribuidos en el borde de ataque, borde de fuga, extradós e intradós respectivamente con el fin de incluir completamente los alrededores del perfil. El radio establecido para los puntos

de control fue de 350mm con una longitud de aristas (length Scale) de 1mm y un factor de expansión de 1.1, Fig.5.2.1.

- Expansión: Este parámetro permite definir la cantidad de capas de elementos alrededor de una superficie en una región perpendicular a la misma, con el fin de cuantificar los efectos de capa límite. En la malla generada se aplicó este parámetro sobre la superficie del perfil definiendo 25 capas de elementos en una región de 5 milímetros perpendicular a la misma.

En las siguientes figuras se puede visualizar el efecto de estos dos parámetros sobre la definición de la malla, Fig.5.2.2 y Fig. 5.2.3

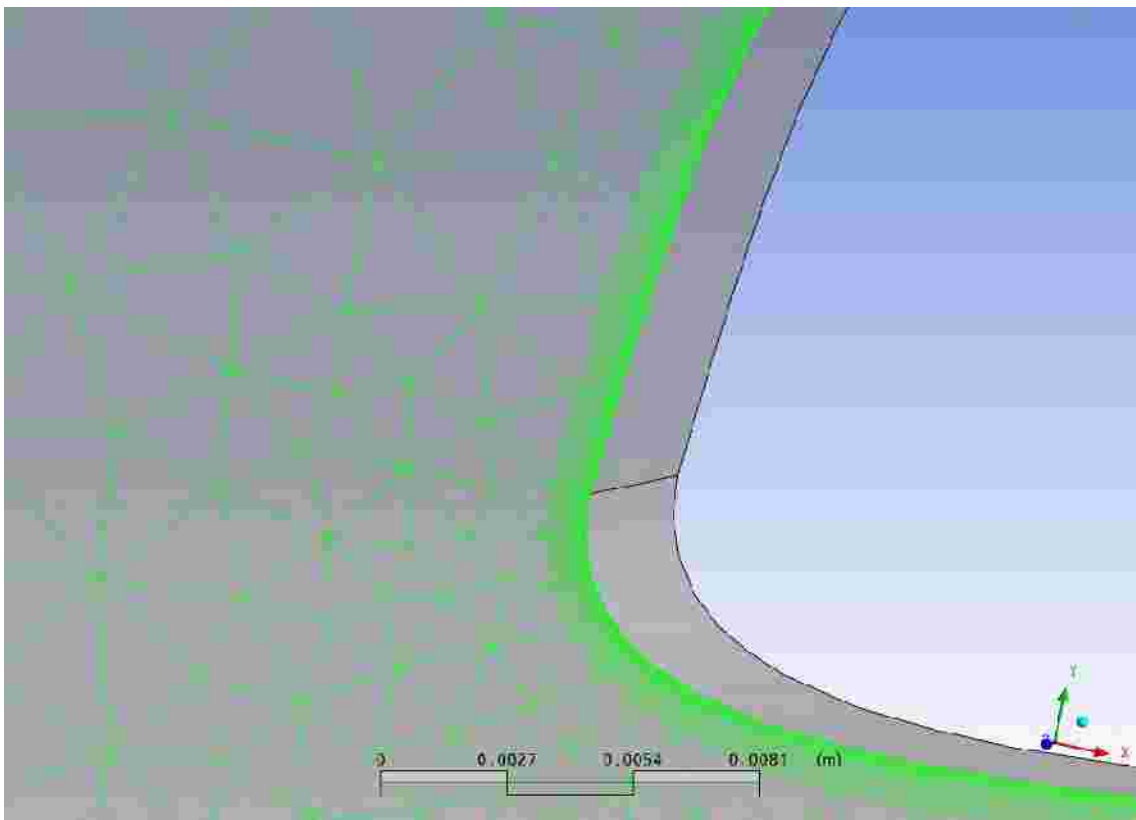


Fig. 5.2.2 Detalle de la expansión en el borde de ataque del perfil S4083

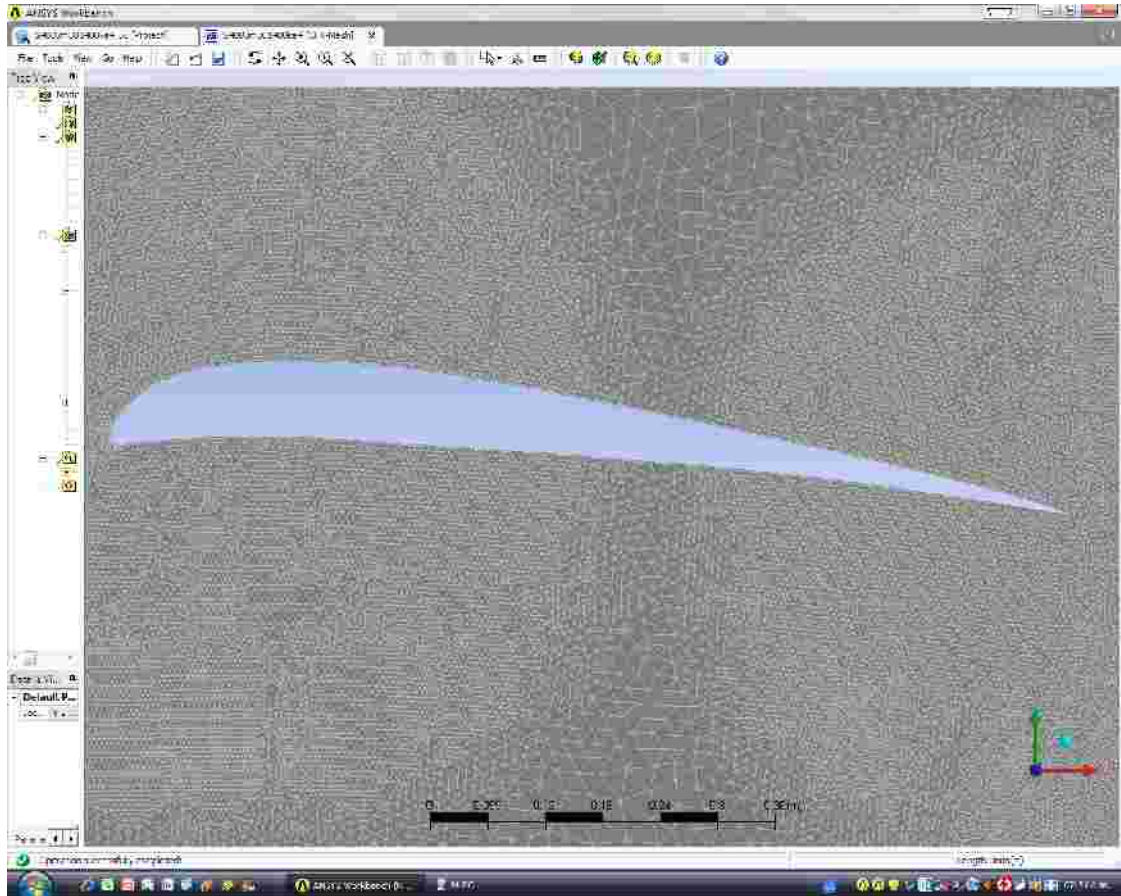


Fig. 5.2.3 Detalle de la definición de nodos de la mal generada

Para generar la malla del volumen se utilizó un parámetro recomendado para simulaciones bidimensionales denominado extrusión 2D, el cual permite extruir capas de nodos entre las superficies que conforman el volumen de control. Este parámetro fue aplicado entre las superficies frontal y trasera, limitando a 1 capa.

Para determinar la influencia de la cantidad de nodos la determinación de  $C_l$  y  $C_d$  se trazó la curva de sensibilidad de la malla, Fig. 5.2.4., que grafica la variación de los resultados para  $C_d$  y  $C_l$  en función de la cantidad de elementos de definen la malla. La finalidad de dicho estudio es refinar la malla hasta que los resultados no varíen significativamente.

Para todas las simulaciones realizadas en este trabajo se generaron mallas con números de elementos cercanos a 600000 y 12800000 elementos en el caso de las simulaciones donde el volumen de control debió ser ampliado.



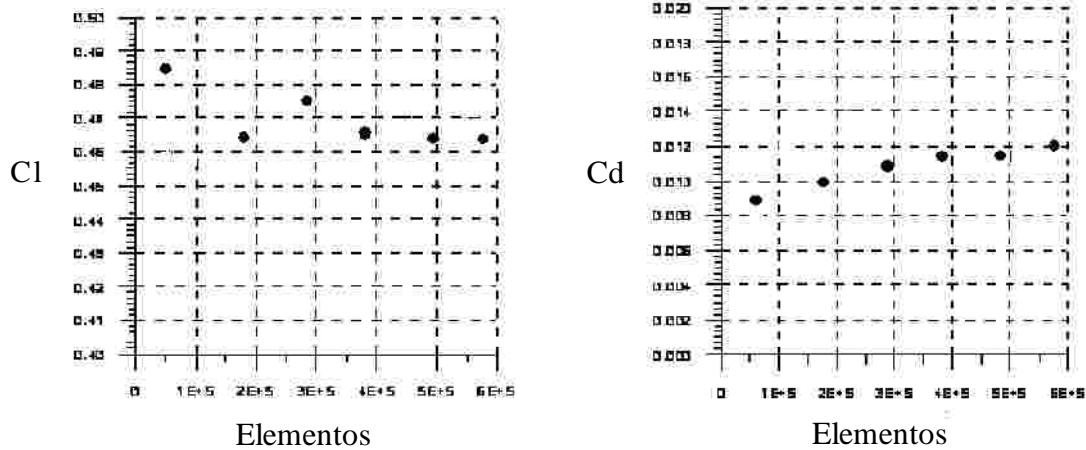


Fig. 5.2.4 Sensibilidad de la malla

### Pre-procesamiento

El modulo de pre-procesamiento CFX-Pre permite al usuario establecer los modelos físicos del problema, las propiedades del fluido, y las condiciones necesarias para realizar la simulación CFD.

En esta etapa lo primero que debe realizarse es importar la malla generada y crear el dominio, el cual esta comprendido por el volumen que abarcara el fluido en la simulación del problema. Este paso permite entre otras cosas especificar el flujo trabajo y sus propiedades. Para el caso en estudio, se selecciono aire a condiciones estándar ( $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . y  $P = 1 \text{ atm.}$ ).

Otro aspecto de importancia que debe seleccionarse en el dominio es el modelo de turbulencia. El modulo de pre-procesamiento posee una amplia librería de modelos de turbulencia aplicables a una gran variedad de situaciones.

Para todas las simulaciones realizadas se utilizo el modelo de turbulencia k-epsilon. Este es un modelo matemático que debido a sus características de robustez y estabilidad se ha convertido en el más popular empleado por los códigos CFD.

Una vez creado el dominio y definidas sus propiedades, deben identificarse las condiciones de borde en función de las regiones creadas anteriormente.

La condición de entrada del volumen de control, se encuentra definida por la región con este mismo nombre, y consiste en un campo de velocidades constante en dirección X, cuyo valor viene dado por el Número de Reynolds al cual se desea realizar la simulación.

La condición de salida del volumen de control, se encuentra delimitada por la región del dominio con este mismo nombre, a la cual se le asigna como valor de presión relativa de salida cero Pa. constante en toda la sección.

Debido a que en este caso se está simulando un problema en 2D, se asigna a las regiones frontal y trasera condiciones de borde de simetría.

A los planos de superficie superior e inferior agrupados en la región llamada sup\_inf, se les definió la condición de pared con una interacción entre el flujo y las mismas de libre deslizamiento.

Como última condición de borde se le asignó a la región comprendida por la superficie del perfil, la condición de pared, con una interacción entre el flujo y la misma de no deslizamiento.

Para finalizar la etapa de pre-procesamiento es necesario establecer los parámetros de inicialización, los cuales pueden ser definidos automáticamente por el programa, o ser especificados manualmente por el usuario. En este caso se utilizó para todas las corridas las condiciones de inicialización establecidas automáticamente por el software.

## **Calculador**

El módulo calculador CFX-Solver, es el encargado de resolver el problema CFD a partir de los parámetros establecidos en la etapa de pre-procesamiento. Este produce los resultados requeridos en un proceso no interactivo. El calculador determina el valor de las variables de la siguiente forma:

- Las ecuaciones diferenciales parciales son integradas sobre todo el volumen de control. Esto es equivalente a la aplicación de las leyes básicas de conservación (por ejemplo, para masa y momento) a cada elemento de volumen de control.
- Estas ecuaciones integrales son convertidas en un sistema de ecuaciones algebraicas por medio de la generación de un conjunto de términos aproximados para las ecuaciones integrales.
- Las ecuaciones algebraicas son resueltas iterativamente.

Se requiere un enfoque iterativo debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones algebraicas, y a medida que la solución aproximada se acerca a la exacta, se dice que el proceso está convergiendo. Por cada iteración, es reportado un error o residuo, como medida de la conservación global de las propiedades del flujo.

La cercanía entre la solución final y la exacta depende de un número de factores, tales como, el tamaño y la forma de los volúmenes de control, y la magnitud de los residuos finales.

Procesos físicos complejos, como la combustión y la turbulencia, son a menudo modelados usando relaciones empíricas. Las aproximaciones inherentes en estos modelos también contribuyen a las deferencias entre la solución CFD y la del flujo real.

El proceso de solución no requiere la intervención del usuario y es generalmente realizado como un procesamiento por lotes.

Finalmente el calculador genera un archivo de resultados que posteriormente es pasado al post-procesador.

Durante este trabajo fueron realizadas aproximadamente 24 corridas efectivas, donde cada una emplea un tiempo promedio de cálculo cercano a 75 min.

### **Post-procesamiento**

El post-procesador es el componente utilizado para analizar, visualizar y presentar los resultados obtenidos. Este módulo permite la representación gráfica de las variables de estudio.

Algunos rasgos importantes de los post-procesadores son:

- Visualización de la geometría y el volumen de control.
- Gráficos vectoriales que permiten visualizar la dirección y magnitud del flujo.
- Visualización de la variación de variables escalares (variables únicamente con valores de magnitud, sin dirección, tales como temperatura, presión y velocidad) dentro del dominio.
- Cálculos numéricos cuantitativos.
- Animaciones.
- Trazado de gráficas que muestran el comportamiento de las variables.
- Salida de impresión.

Para nuestro caso de estudio se presentan las figuras correspondientes a la distribución de presiones, distribución de velocidades y líneas de corriente de dos perfiles evaluados a 3 ángulos de incidencia y número de Reynolds

### 5.3. Simulación Computacional del Flujo Alrededor del Perfil S4083

Se presentan las representaciones gráficas de la distribución de velocidades, distribución de presiones y líneas de corriente del perfil S4083 divididos en dos grupos  $Re=301400$  para ángulo de incidencia  $\alpha = -0.05$ ,  $\alpha = 4.56$  y  $\alpha = 9.17$  y  $Re=200700$  para  $\alpha = -0.05$ ,  $\alpha = 4.57$  y  $\alpha = 9.15$ .

#### 5.3.1 Simulación computacional del perfil S4083 para $Re= 200700$

Los parámetros de simulación para este caso son los siguientes: (Tabla 5.3.1)

Tabla 5.3.1 Parámetros de Simulación perfil S4083  $Re= 200700$

PARAMETRO	
Número de Reynolds	200700
Cuerda del perfil	1000mm
Condición de entrada	Velocidad $V_0=3,13092$ m/s
Condición de salida	$P_a = 0$
Temperatura	$25^\circ C$
Modelo de Transferencia de Calor	isotérmico
Modelo de Turbulencia	k-epsilon
Región - Perfil	Pared (No deslizante)

A continuación se presentan la representación gráfica de las líneas de corriente para  $\alpha = -0.05$  Fig. 5.3.1.1,  $\alpha = 4.57$  Fig. 5.3.1.2 y  $\alpha = 9.15$  Fig. 5.3.1.3

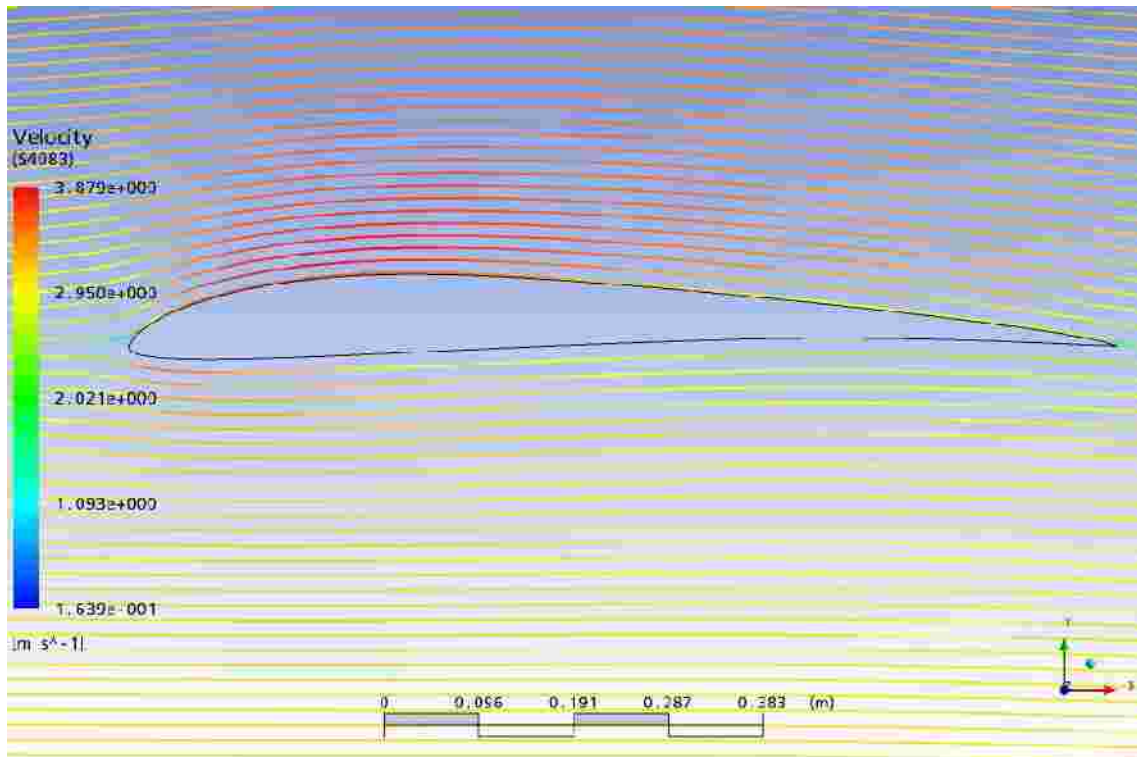


Fig.5.3.1.1 Líneas de corriente del perfil S4083 con  $\alpha = -0.05$  y  $Re=200700$

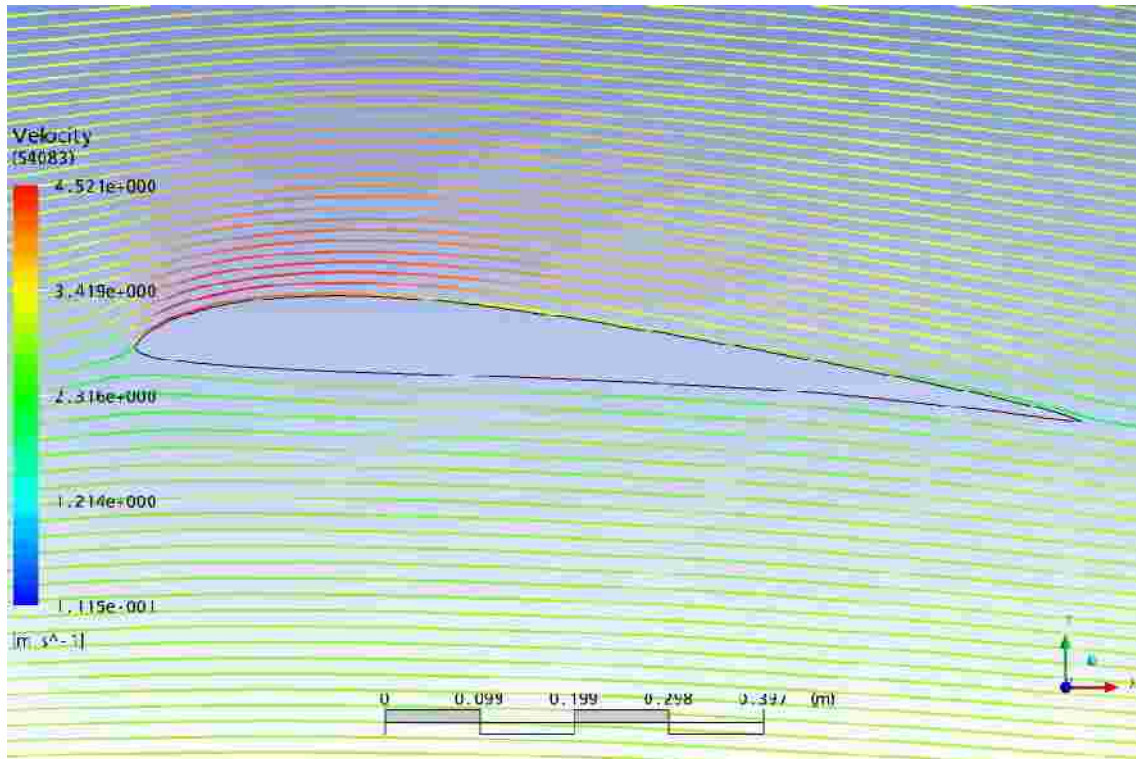


Fig.5.3.1.2 Líneas de corriente del perfil S4083 con  $\alpha = 4.5.7$  y  $Re=200700$

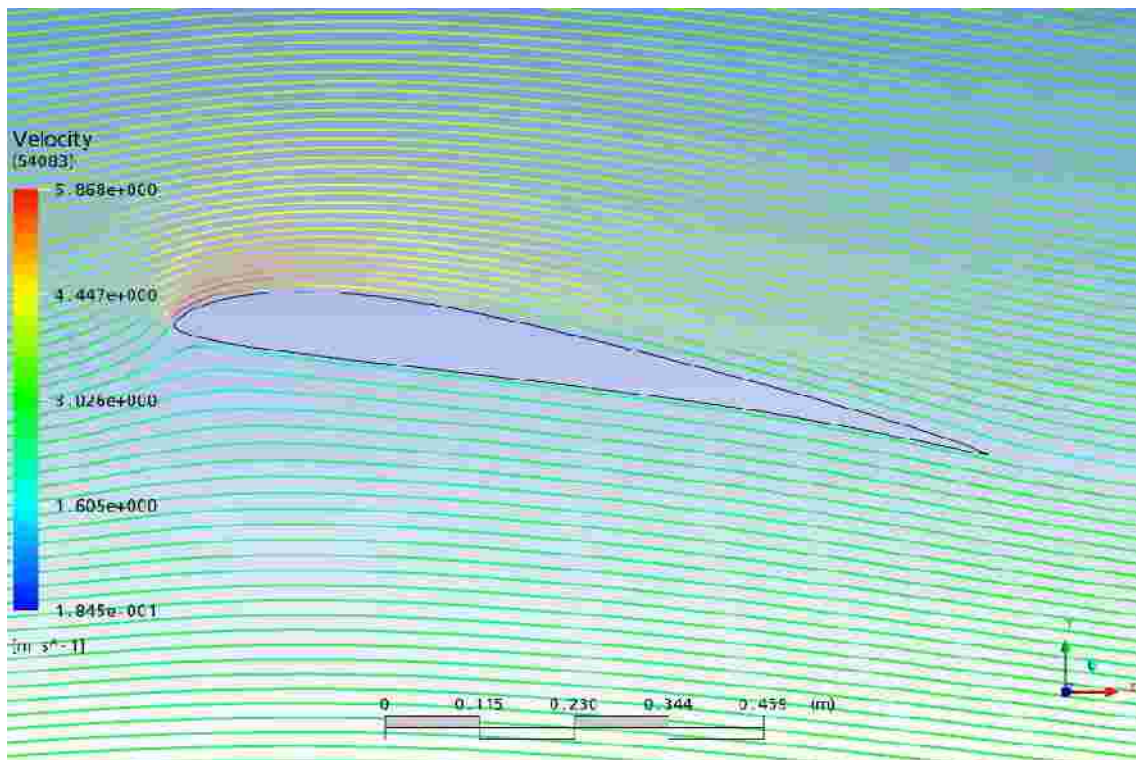


Fig.5.3.1.3 Líneas de corriente del perfil S4083 con  $\alpha =9.15$  y  $Re=200700$

A continuación se presentan la representación gráfica la distribución de presiones para  $a = -0.05$  Fig. 5.3.1.4,  $a = 4.57$  Fig. 5.3.1.5 y  $a = 9.15$  Fig. 5.3.1.6

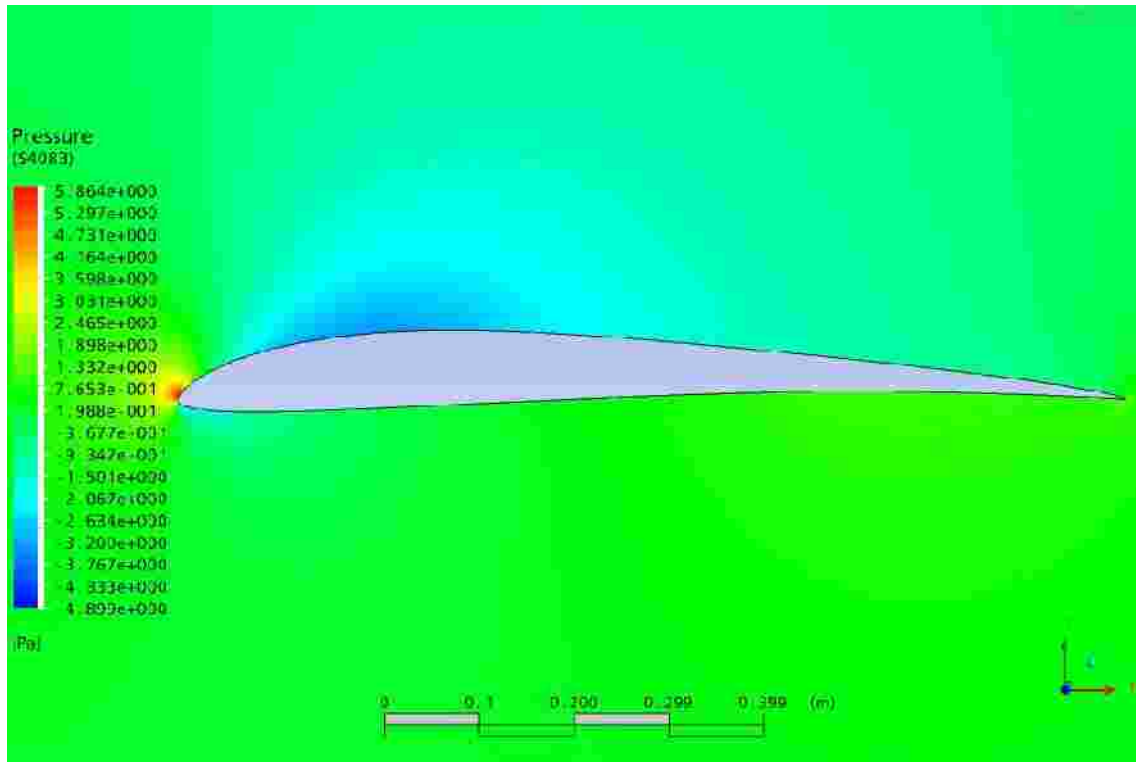


Fig.5.3.1.4 Distribución de presiones del perfil S4083 con  $a = -0.05$  y  $Re=200700$

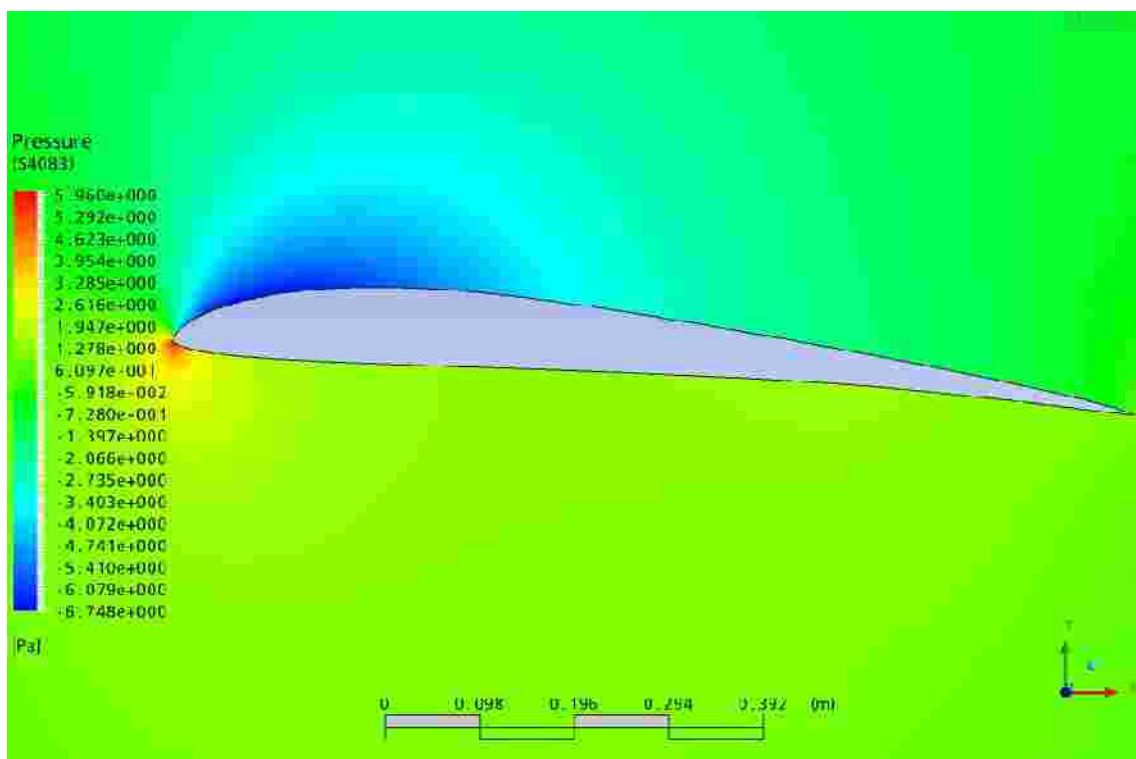


Fig.5.3.1.5 Distribución de presiones del perfil S4083 con  $a = 4.57$  y  $Re=200700$

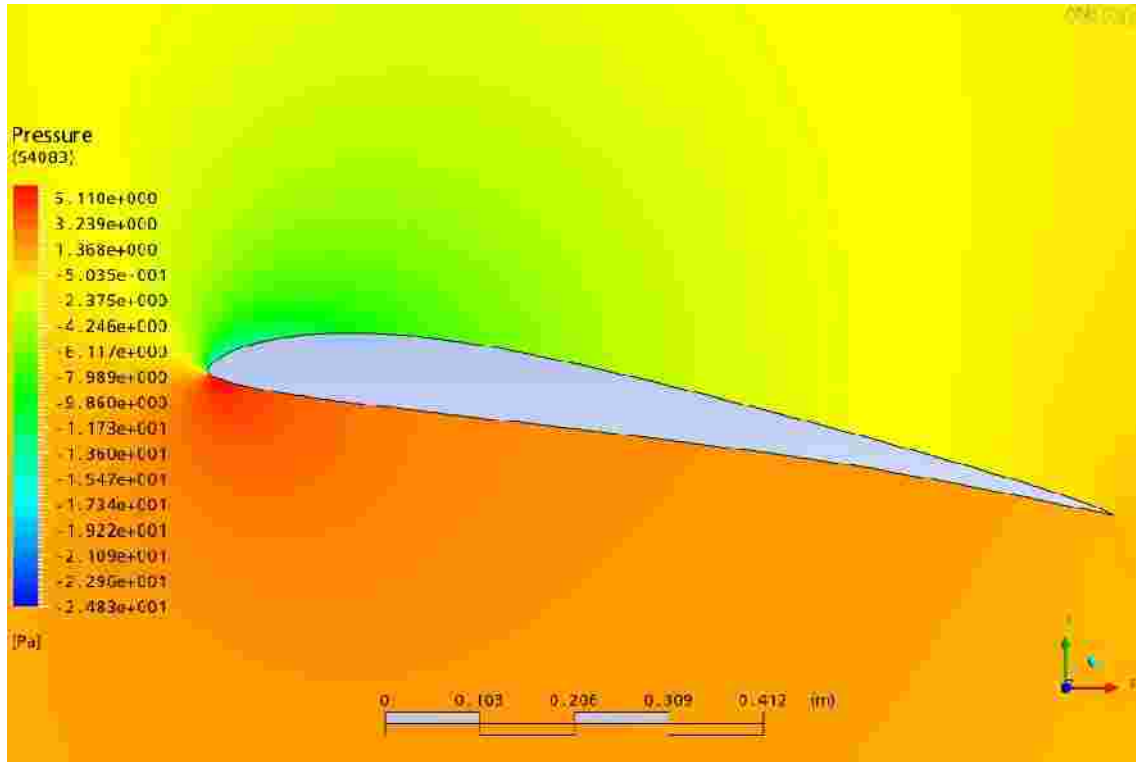


Fig.5.3.1.6 Distribución de presiones del perfil S4083 con  $\alpha = 9.15$  y  $Re=200700$

A continuación se presentan la representación gráfica de la distribución de velocidades para  $\alpha = -0.05$  Fig. 5.3.1.7,  $\alpha = 4.57$  Fig. 5.3.1.8 y  $\alpha = 9.15$  Fig. 5.3.1.9

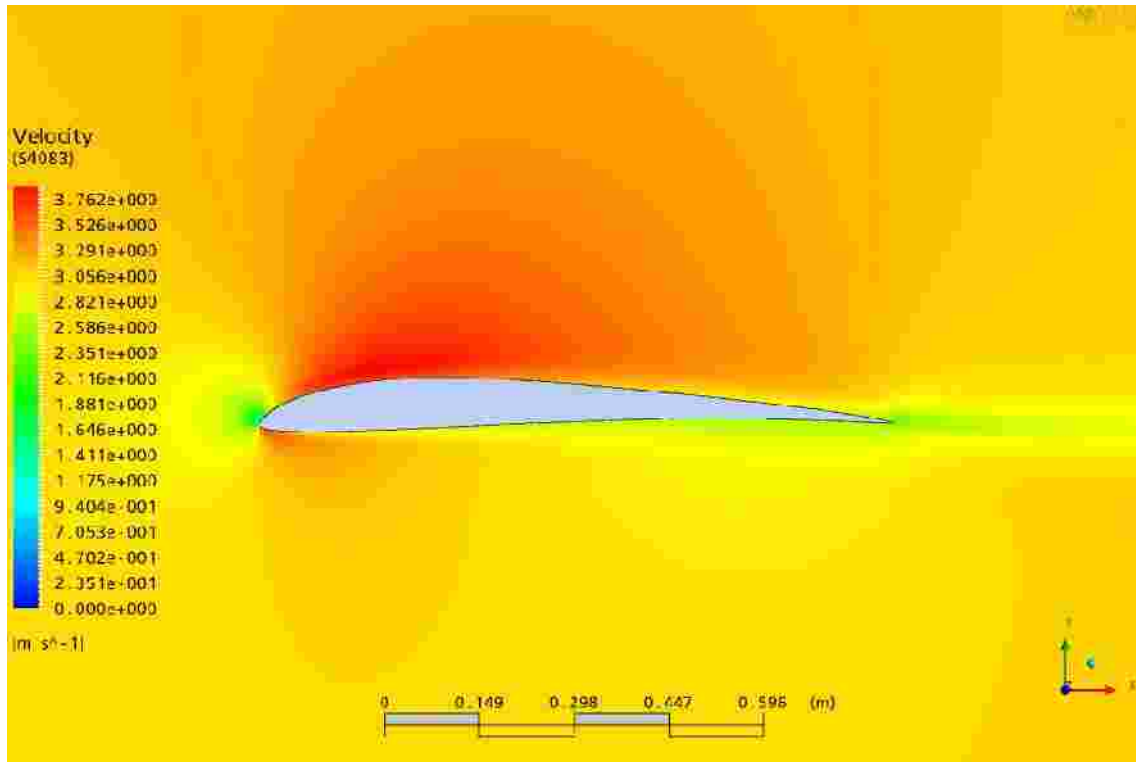


Fig.5.3.1.7 Distribución de velocidades del perfil S4083 con  $\alpha = -0.05$  y  $Re=200700$

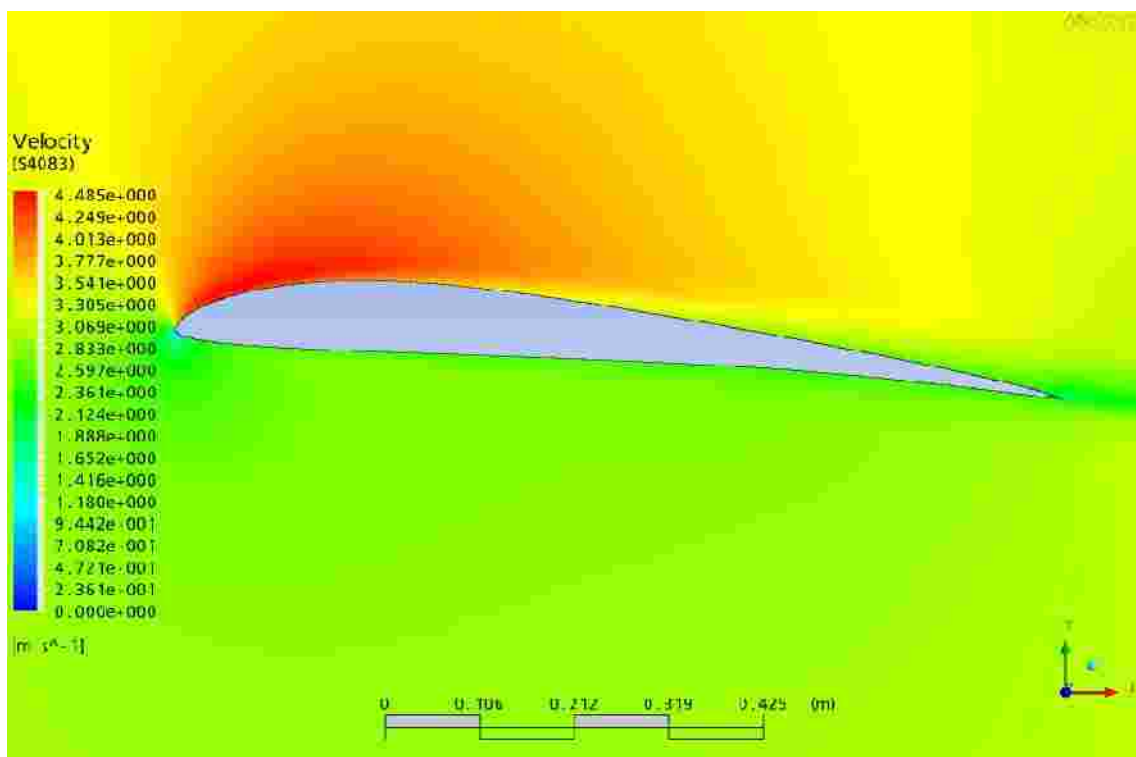


Fig.5.3.1.8 Distribución de velocidades del perfil S4083 con  $\alpha = 4.57$  y  $Re=200700$



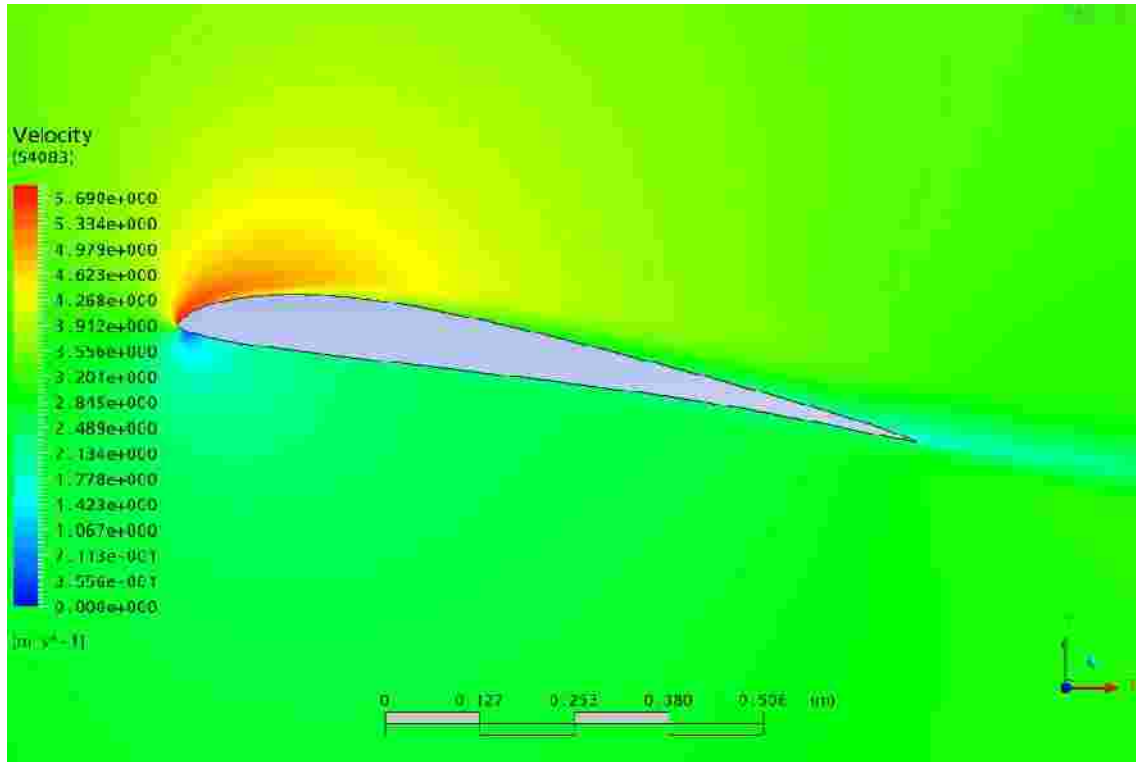


Fig.5.3.1.9 Distribución de velocidades del perfil S4083 con  $\alpha = 9.15$  y  $Re=200700$

### 5.3.2 Simulación computacional del perfil 4083 para $Re= 301400$

Los parámetros de simulación para este caso son los siguientes: (Tabla 5.3.2)

Tabla 5.3.2 Parámetros de Simulación perfil S4083  $Re= 301400$

PARAMETRO	
Número de Reynolds	301400
Cuerda del perfil	1000mm
Condición de entrada	Velocidad $V_0=4,70184$ m/s
Condición de salida	$P_a = 0$
Temperatura	$25^\circ \text{C}$
Modelo de Transferencia de Calor	isotérmico
Modelo de Turbulencia	k-epsilon
Región - Perfil	Pared (No deslizante)

A continuación se presentan la representación gráfica de las líneas de corriente para  $\alpha = -0.05$  Fig. 5.3.2.1,  $\alpha = 4.56$  Fig. 5.3.2.2 y  $\alpha = 9.17$  Fig. 5.3.2.3

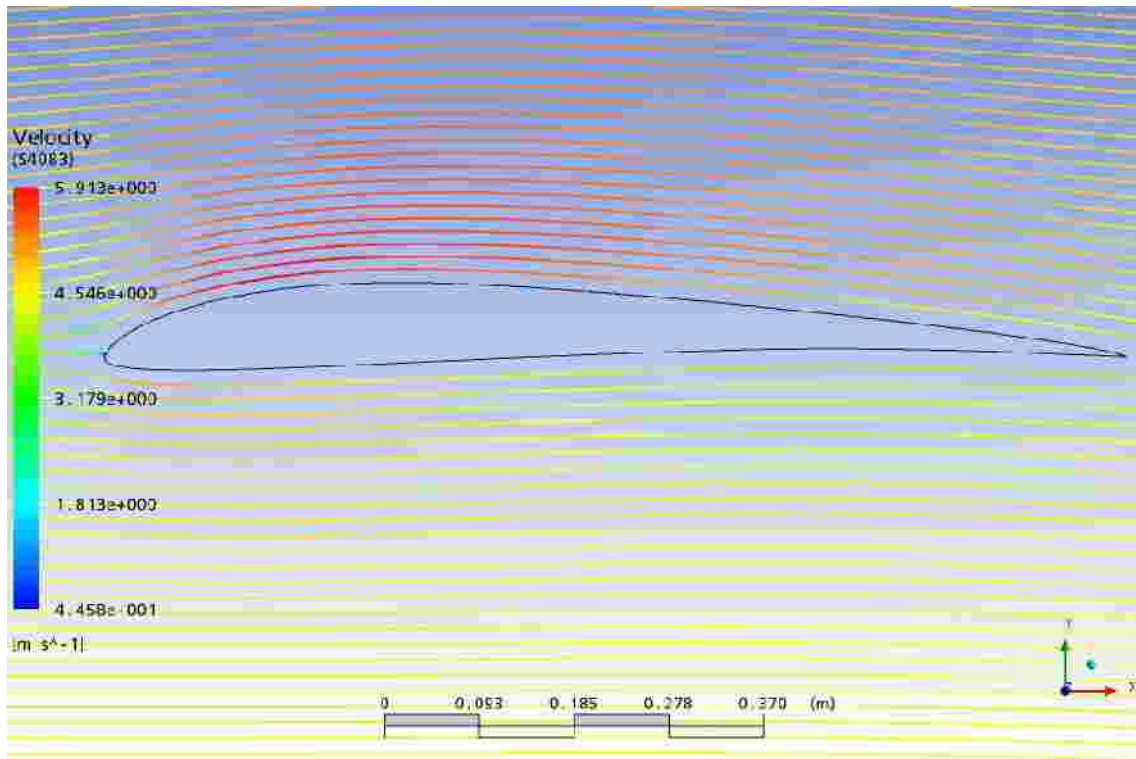


Fig. 5.3.2.1 Líneas de corriente del perfil S5083 con  $\alpha = -0.05$  y  $Re=301400$

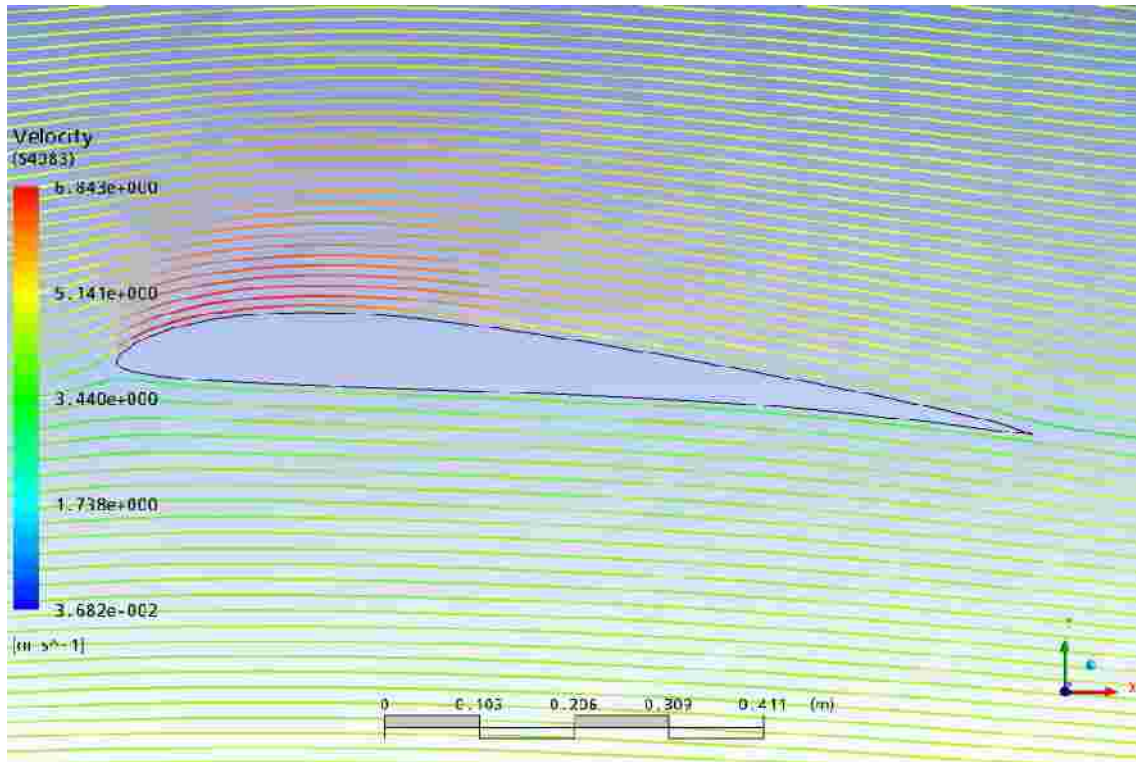


Fig. 5.3.2.2 Líneas de corriente del perfil S5083 con  $a = 4.56$   $Re=301400$

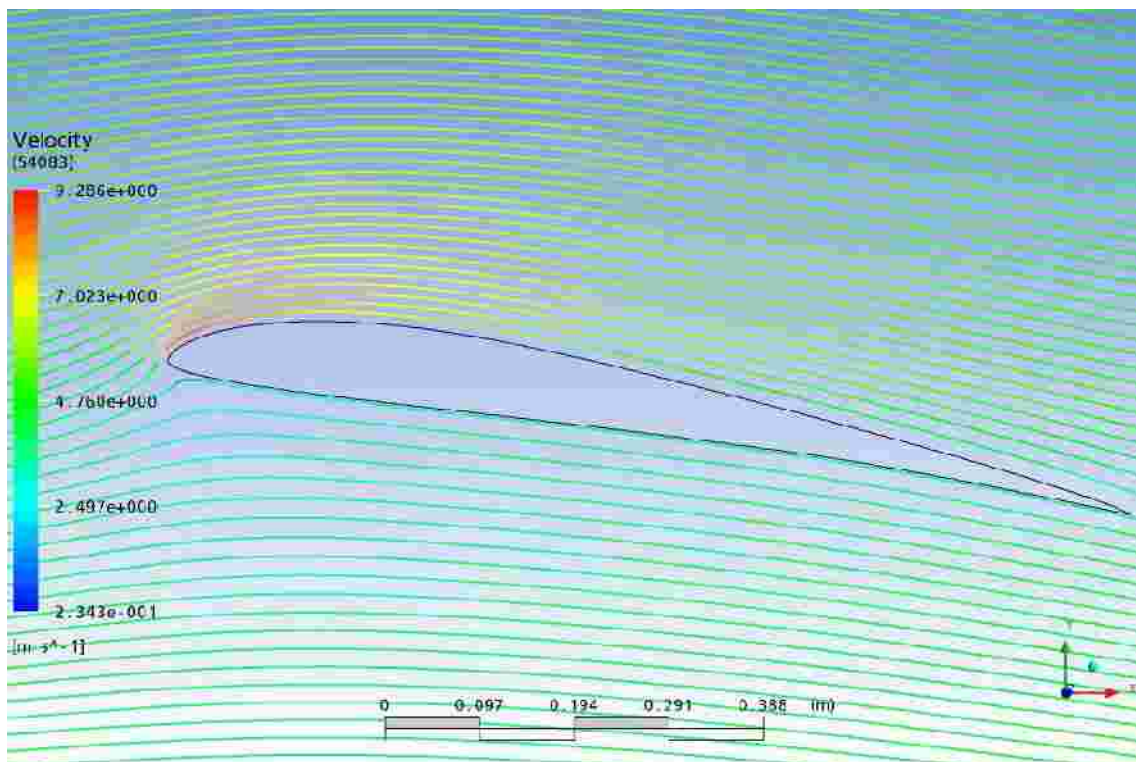


Fig. 5.3.2.3 Líneas de corriente del perfil S5083 con  $a = 4.56$   $Re=301400$

A continuación se presentan la representación gráfica la distribución de presiones para  $\alpha = -0.05$  Fig. 5.3.2.4,  $\alpha = 4.57$  Fig. 5.3.2.5 y  $\alpha = 9.15$  Fi 5.3.2.6

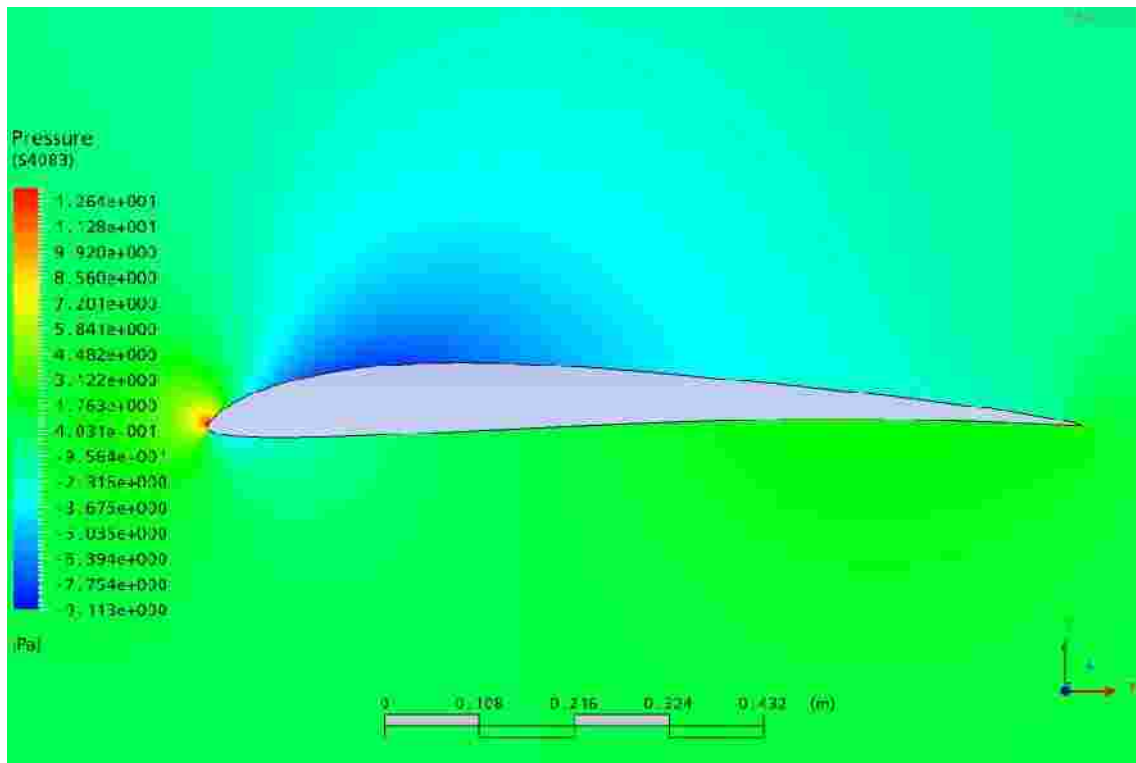


Fig.5.3.2.4 Distribución de presiones del perfil S4083 con  $\alpha = -0.05$  y  $Re=301400$

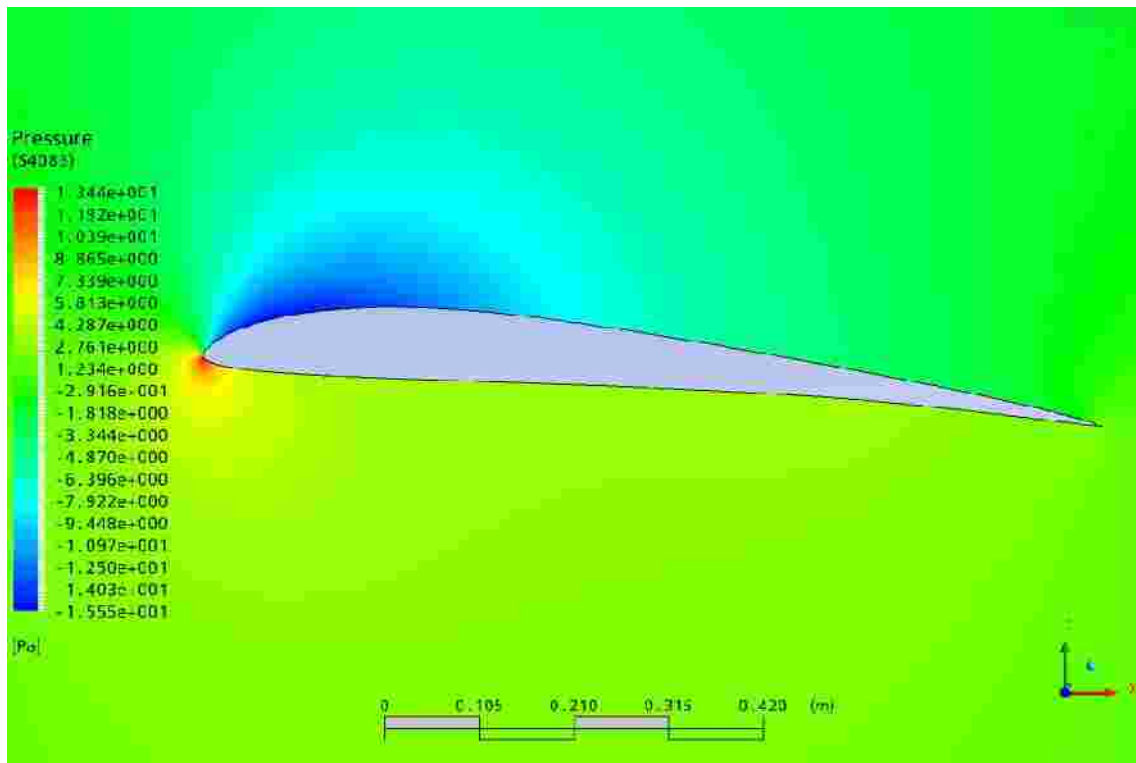


Fig.5.3.2.5 Distribución de presiones del perfil S4083 con  $\alpha = 4.56$  y  $Re=301400$

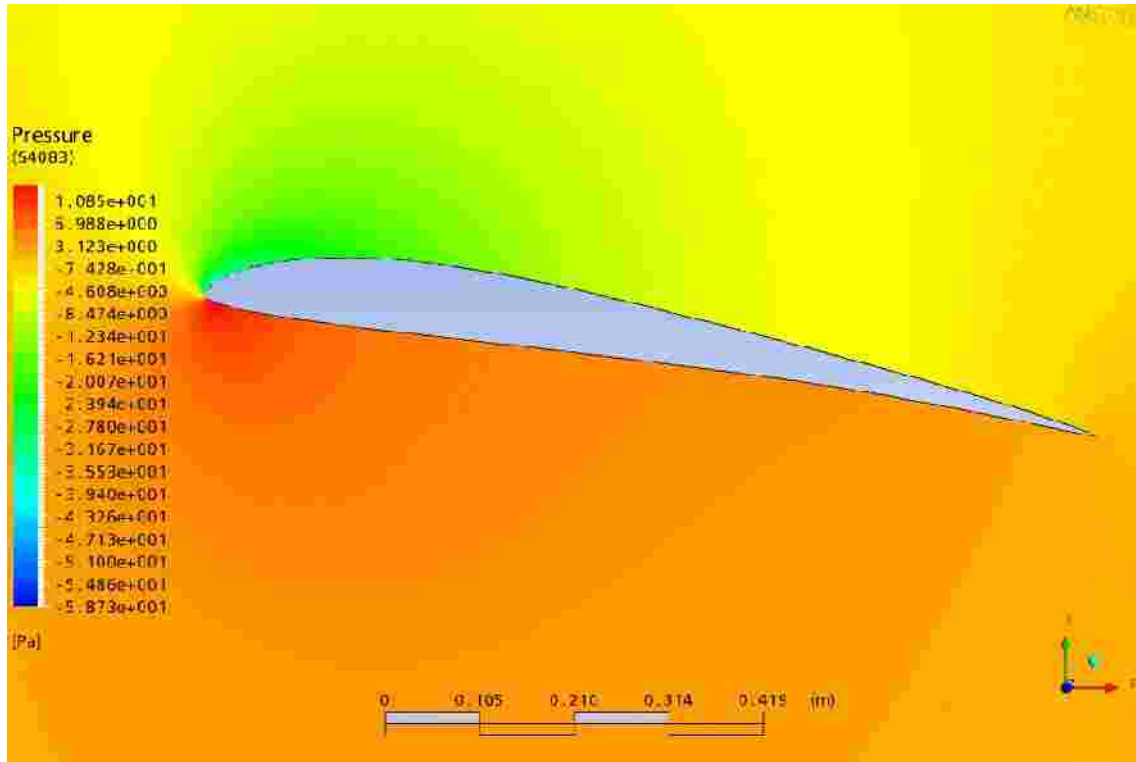


Fig.5.3.2.6 Distribución de presiones del perfil S4083 con  $\alpha = 9.17$  y  $Re=301400$

A continuación se presentan la representación gráfica de la distribución de velocidades para  $\alpha = -0.05$  Fig. 5.3.2.7,  $\alpha = 4.57$  Fig. 5.3.2.8 y  $\alpha = 9.15$  Fig. 5.3.2.9

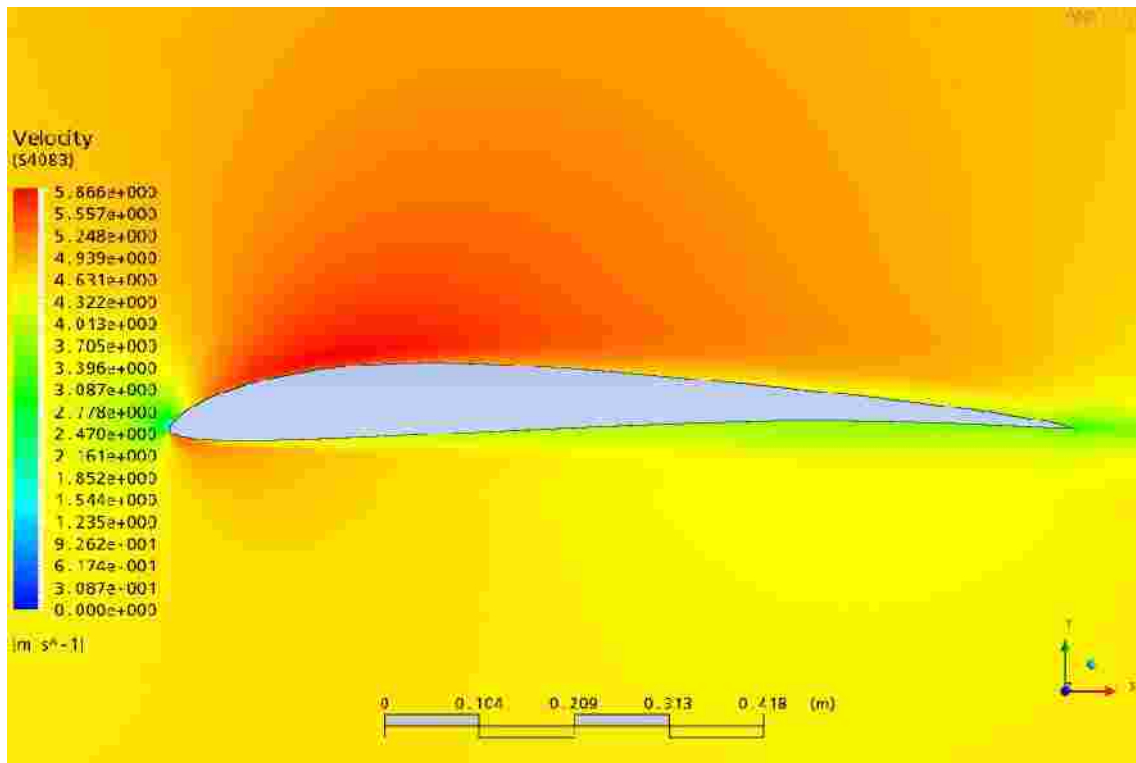


Fig.5.3.2.7 Distribución de velocidades del perfil S4083 con  $\alpha = -0.05$  y  $Re=301400$

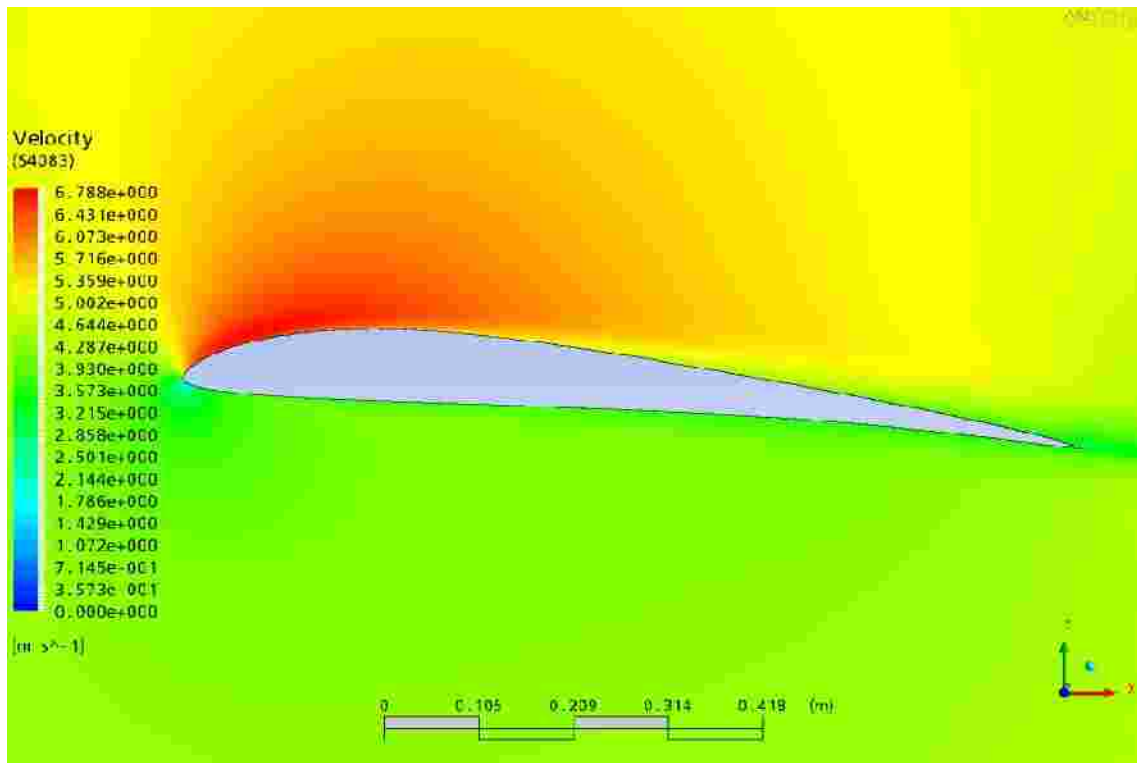


Fig.5.3.2.8 Distribución de velocidades del perfil S4083 con  $\alpha = 4.56$  y  $Re=301400$

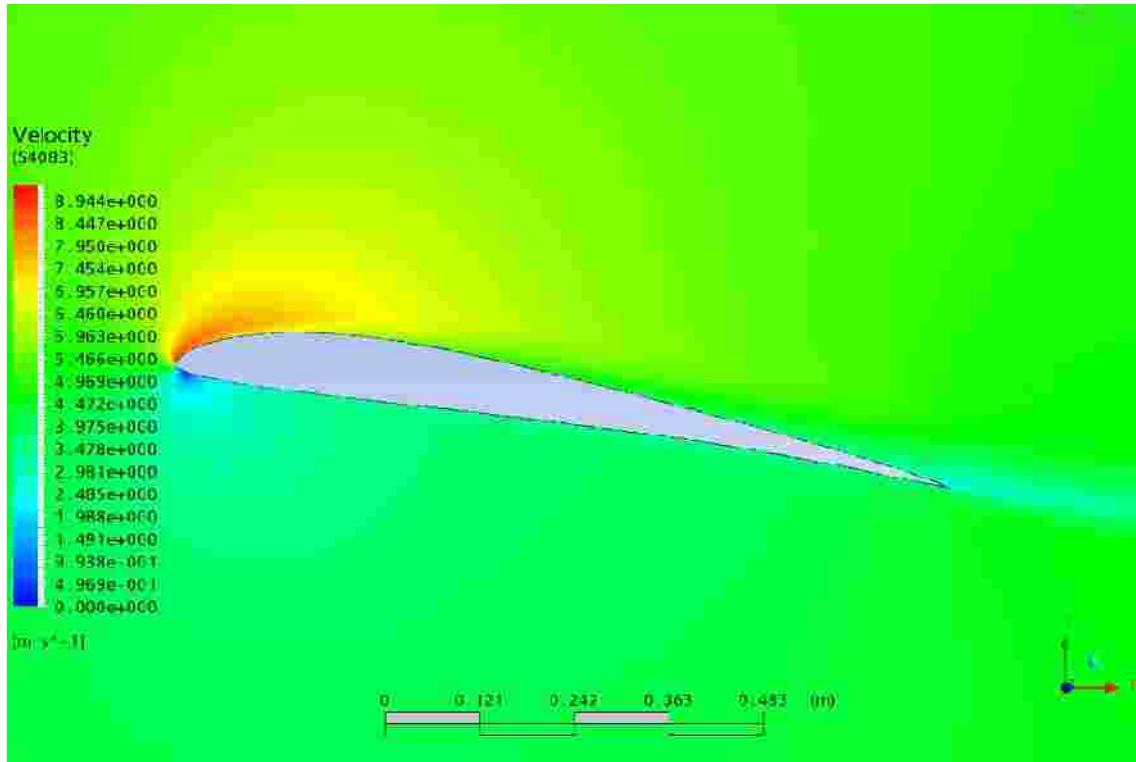


Fig.5.3.2.9 Distribución de velocidades del perfil S4083 con  $\alpha = 9.17$  y  $Re=301400$

## 5.4 Simulación Computacional del Flujo Alrededor del Perfil ZAREA 4083

Se presentan las representaciones gráficas de la distribución de velocidades, distribución de presiones y espectro aerodinámico del perfil ZAREA divididos en dos grupos  $Re=200700$  para  $\alpha = -0.05$ ,  $\alpha = 4.57$  y  $\alpha = 9.15$  y  $Re=301400$  para ángulo de incidencia  $\alpha = -0.05$ ,  $\alpha = 4.56$  y  $\alpha = 9.17$ .

### 5.4.1 Simulación computacional del perfil ZAREA 4083 para $Re= 200700$

Los parámetros de simulación para este caso son los siguientes: (Tabla 5.4.1)

Tabla 5.4.1 Parámetros de Simulación perfil ZAREA 4083  $Re=200700$

PARAMETRO	
Número de Reynolds	200700
Cuerda del perfil	1000mm
Condición de entrada	Velocidad $V_0=3,13092$ m/s
Condición de salida	$P_a = 0$
Temperatura	$25^\circ$ C
Modelo de Transferencia de Calor	isotermico
Modelo de Turbulencia	k-epsilon
Región - Perfil	Pared (No deslizante)

A continuación se presenta la representación gráfica de las líneas de corriente para  $\alpha = -0.05$  Fig. 5.4.1.1,  $\alpha = 4.57$  Fig. 5.4.1.2 y  $\alpha = 9.15$  Fig. 5.4.1.3

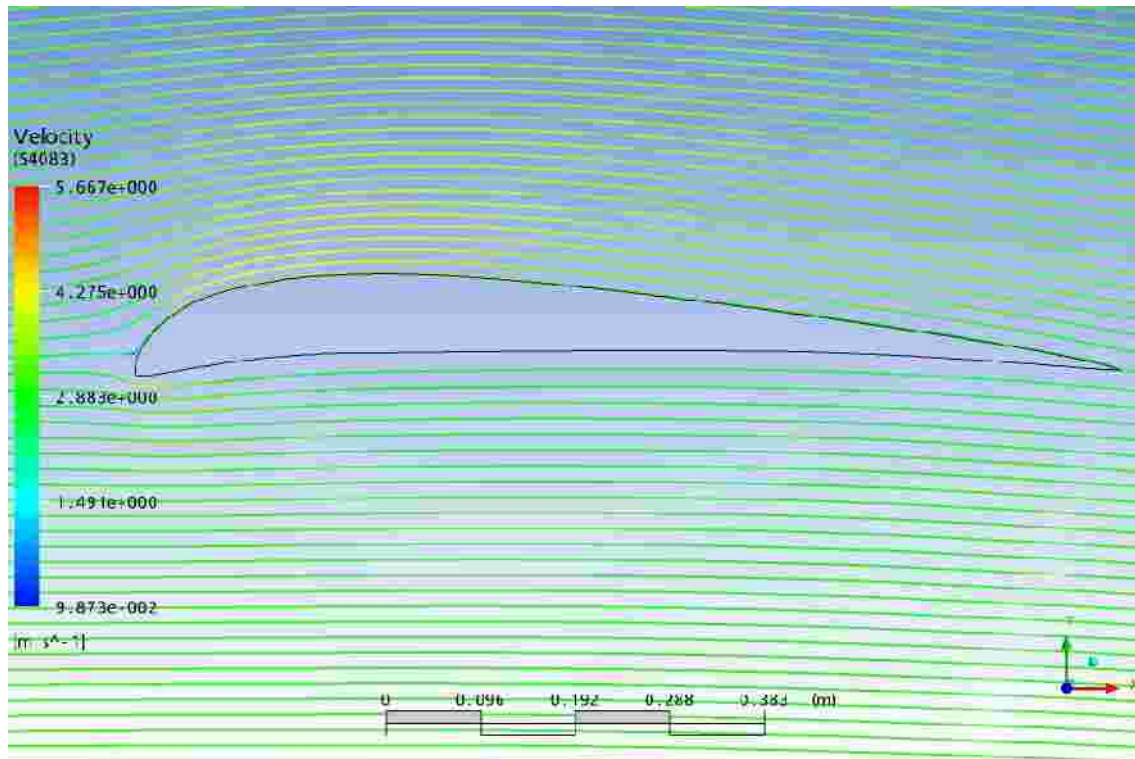


Fig.5.4.1.1 Líneas de corriente del perfil S5083 con  $\alpha = -0.05$  y  $Re=200700$



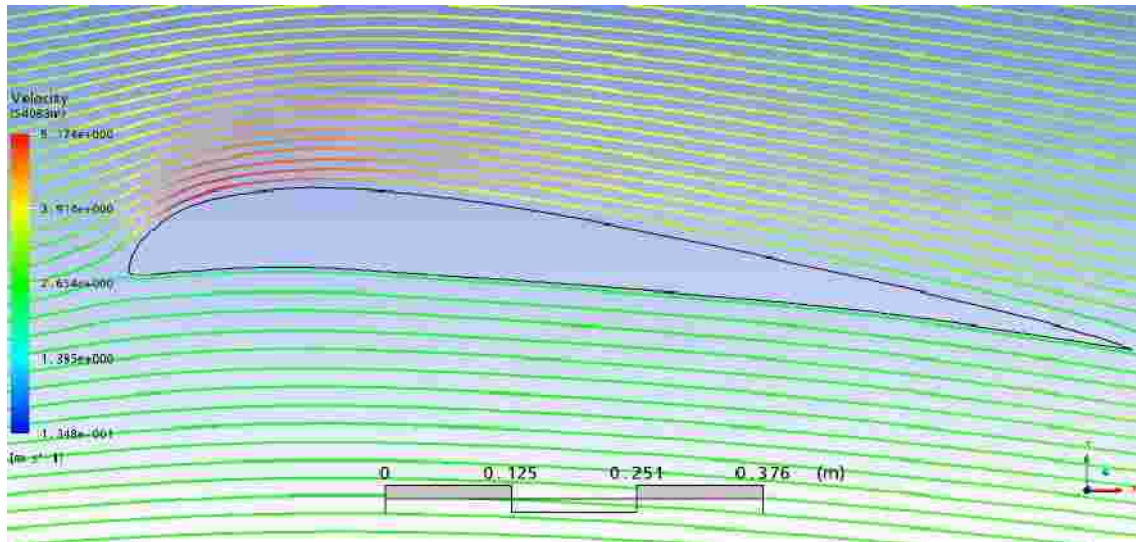


Fig.5.4.1.2 Líneas de corriente del perfil ZAREA5083 con  $a = 4.56$  y  $Re=200700$

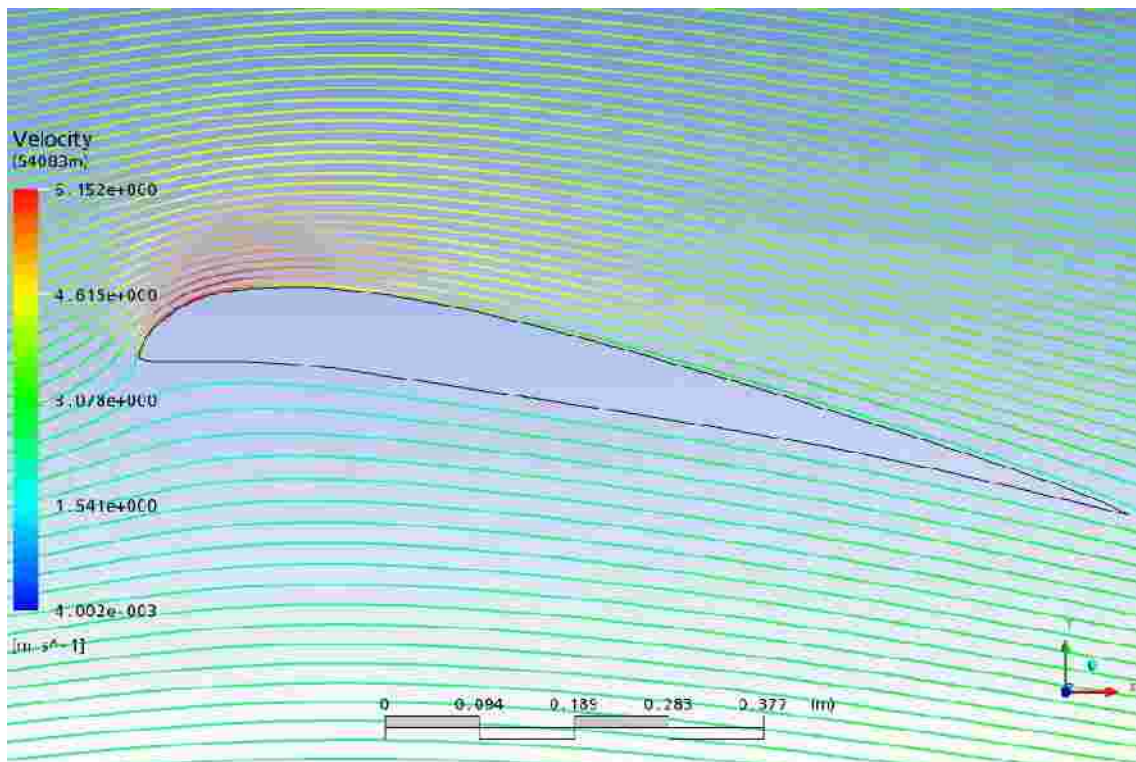


Fig.5.4.1.3 Líneas de corriente del perfil ZAREA4083 con  $a = 9.17$  y  $Re=200700$

A continuación se presentan la representación gráfica la distribución de presiones para  $a = -0.05$  Fig. 5.4.1.4,  $a = 4.56$  Fig. 5.3.1.5 y  $a = 9.15$  Fig. 5.3.1.6

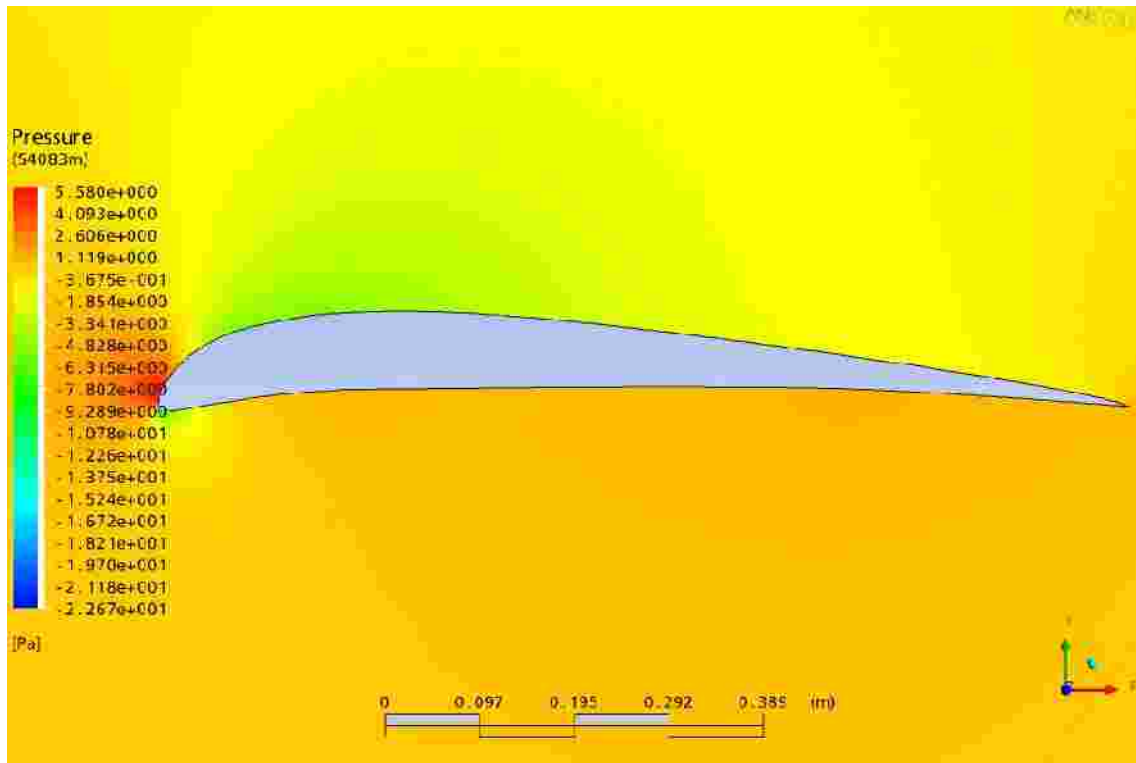


Fig.5.4.1.4 Distribución de presiones del perfil ZAREA 4083  $a = -0.05$  y  $Re = 200700$

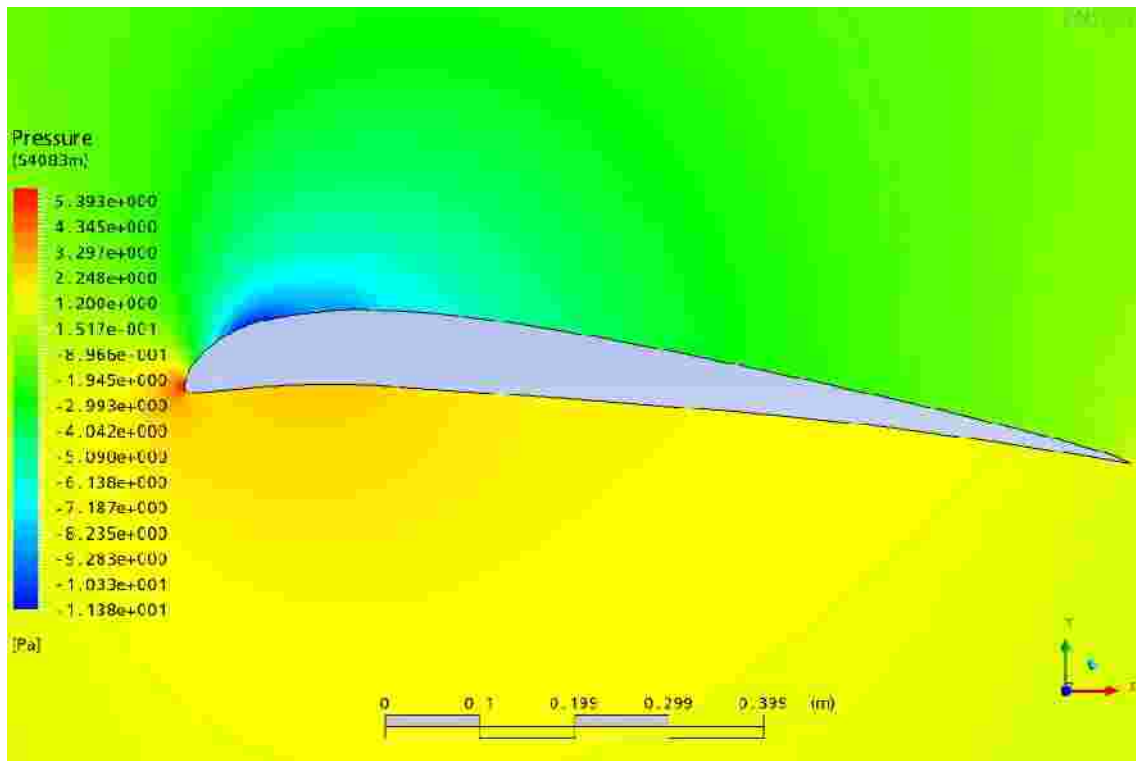


Fig.5.4.1.5 Distribución de presiones del perfil ZAREA 4083  $a = 4.56$  y  $Re = 200700$

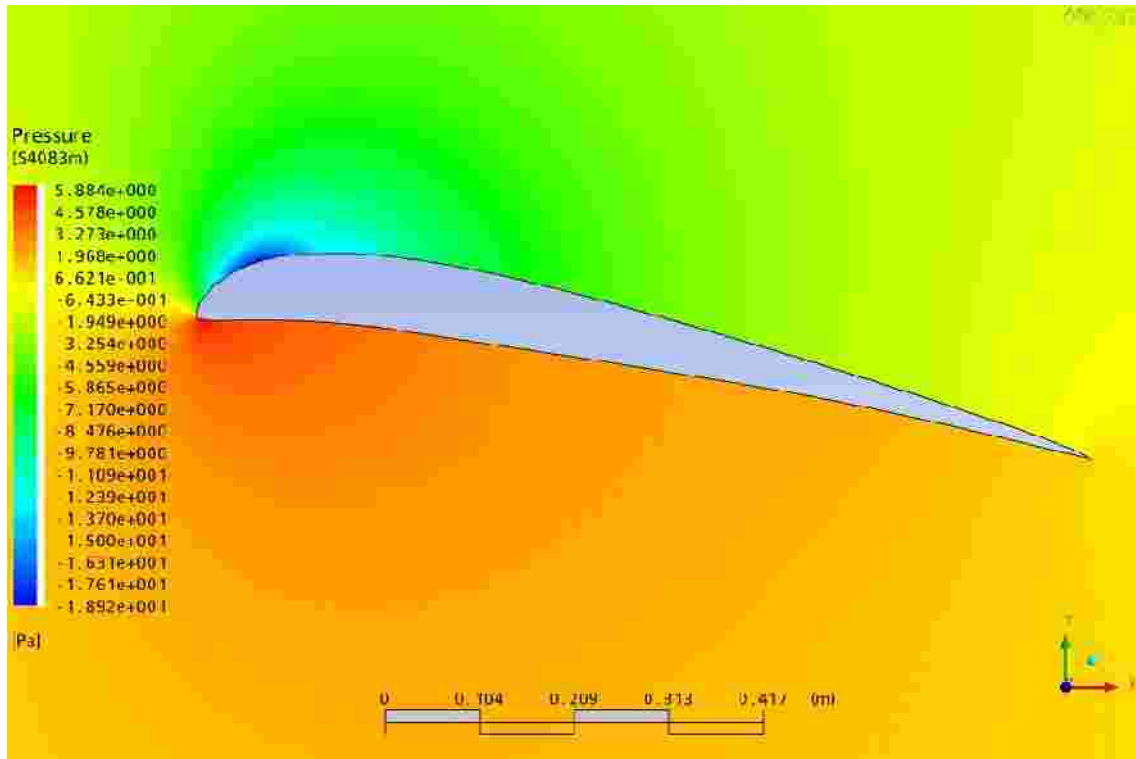


Fig.5.4.1.6 Distribución de presiones del perfil ZAREA 4083 a = 9.17 y Re=200700

A continuación se presentan la representación gráfica de la distribución de velocidades para  $\alpha = -0.05$  Fig. 5.4.1.7,  $\alpha = 4.57$  Fig. 5.4.1.8 y  $\alpha = 9.15$  Fig. 5.4.1.9

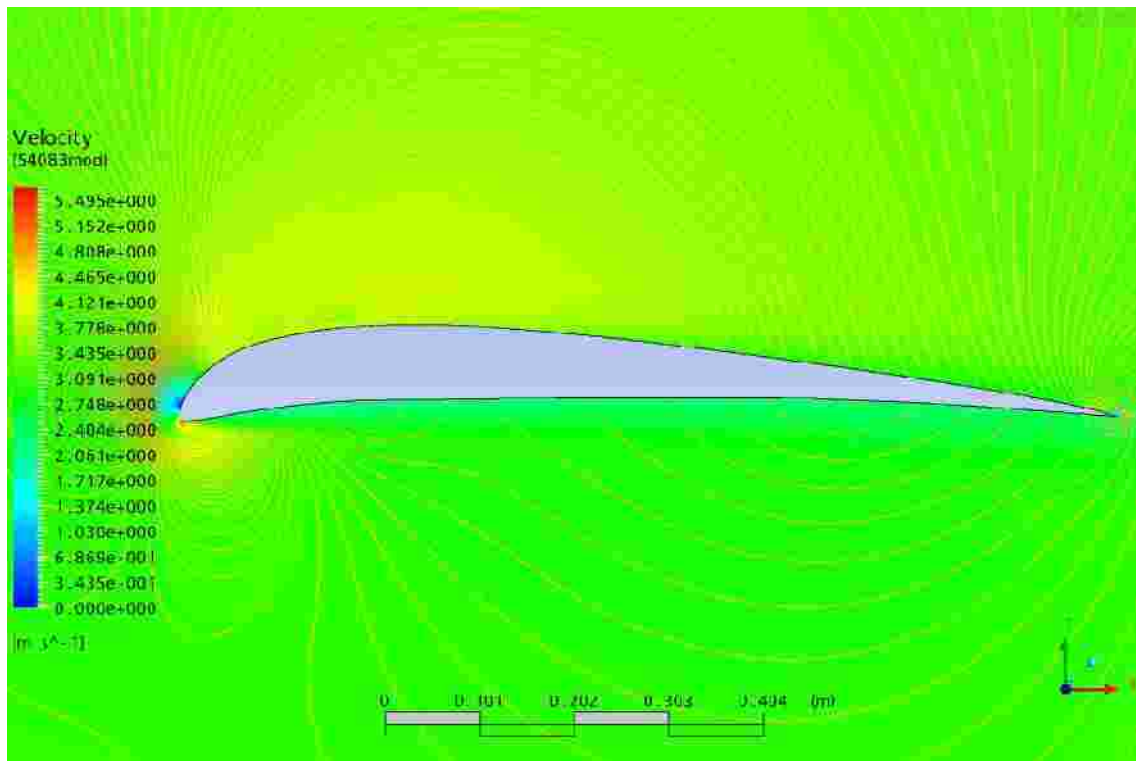


Fig.5.4.1.7 Distribución de velocidades del perfil ZAREA 4083  $\alpha = -0.05$  y  $Re=200700$

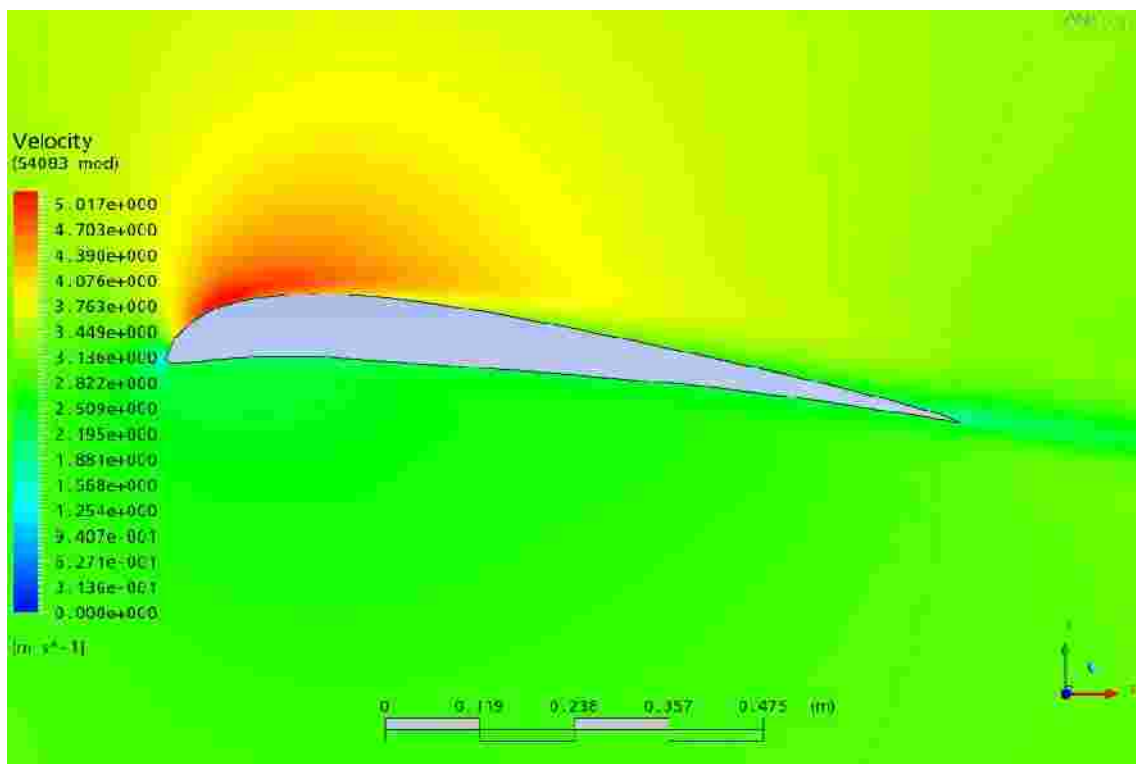


Fig.5.4.1.8 Distribución de velocidades del perfil ZAREA 4083  $\alpha = 4.56$  y  $Re=200700$

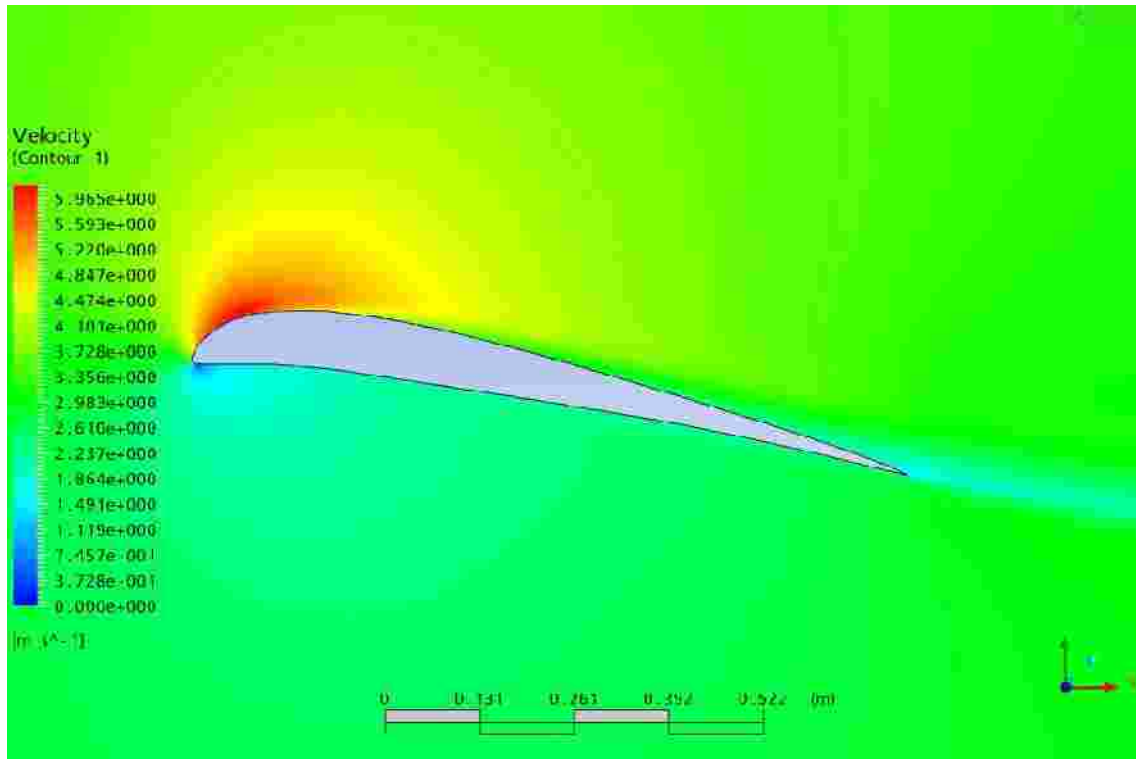


Fig.5.4.1.9 Distribución de velocidades del perfil ZAREA 4083 a = 9.17 y Re=200700

## 6. CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

El estudio realizado permite formular las siguientes conclusiones:

1. El procesamiento de los datos experimentales de la serie SELIG y la evaluación computacional del comportamiento aerodinámico de los mismos puso en evidencia que el programa Visual Foil 4.1 puede ser utilizado para el estudio de estos perfiles, aunque en algunos casos los errores relativos son mayores de 15%.
2. El procedimiento utilizado para la modificación del borde de ataque permite el incremento del coeficiente de sustentación y ligeramente de la fineza aerodinámica de perfiles conocidos. La aplicación de este método a los perfiles SELIG y SZ2400 permitió cuantificar estas mejorías.
3. Los perfiles base y modificados estudiados fueron evaluados con el código Visual Foil 4.1 y algunos con Desing FOIL 5.32 arrojando resultados confiables
4. Utilizando el software ANSYS CFX se realizó la simulación de flujo alrededor del perfil S4083 para dos números de Reynolds (200700 y 301400) y 5 valores de ángulo de ataque (-0.05, 4.56, 4.57, 9.15 y 9.17). Se obtuvieron los espectros aerodinámicos y las imágenes de las zonas de diferentes valores de presión y de velocidad. Los valores de  $C_l$  obtenidos con ANSYS CFX son menores que los datos experimentales, pero los valores de  $C_d$  resultaron dos veces más altos que los experimentales. Estos resultados ponen en evidencia las ventajas y las limitaciones del programa ANSYS CFX.

## **6.2 Recomendaciones**

Para futuras investigaciones sobre perfiles aerodinámicos a realizarse con el software ANSYS CFX sería recomendable (sugerencia del sentido común):

- Usar computadoras con capacidad elevada de procesamiento.
- Utilizar mallas estructuradas en sustitución de las mallas no estructuradas que ofrece CFX.
- Refinar las mallas adecuadamente a los requerimientos del problema estudiado
- Incluir el valor de la rugosidad en los cálculos.
- Utilizar el modelo de turbulencia más adecuado.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABBOTT, I. H., & VON DOENHOFF, A. E., 1959, *Theory of Wing Sections*, Dover Publications, Inc. New York, USA.
- ANDERSON, J. y BARLOW, B. J., 1979, A Study of the Dropped Leading Edge Airfoil, University of Maryland, College Park Department of Aerospace Engineering, pp. 41.
- ANDERSON, Jr., 2006, *Fundamentals of Aerodynamics*, Mcgraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering, Fourth Edition, USA.
- APARICIO, G. J. A., 2006, Influencia del Borde de Fuga Romo Sobre Las Curvas Características de Perfiles Aerodinámicos GOE, NACA y FX, Tesis, Universidad Central de Venezuela, Tutor S. Zarea, Caracas.
- BARITTO, L., 2007, Ascenso de Burbujas de Taylor en Mini-Conductos verticales de sección No-Circular: Estudio Numérico, Tesis, Universidad Central de Venezuela, Tutor J. Segura, Caracas.
- BRAGG, M. B., AND JACOBS, J. J., 2006, Particle Image Velocimetry Measurements of the Separation Bubble on an Iced Airfoil, 24th *AIAA Applied Aerodynamics Conference*, San Francisco, CA, pp.14
- BRAGG, M. B., AND JACOBS, J. J., 2007, Two- and Three-Dimensional Iced Airfoil Separation Bubble Measurements by Particle Image Velocimetry, *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno, NV, pp. 16.
- CHANDRASEKHARA, M. S., et al, 1997, Design and Development of Dynamically Deforming Leading Edge Airfoil for Unsteady Flow Control, NAVY-NASA, pp. 10.
- CHANDRASEKHARA, M. S. y TUNG, P. B., 2004, Aerodynamic Flow Control using a Variable Droop Leading Edge Airfoil, Navy-NASA, pp. 19.
- CHARLES L. et al., 1996, *Computer Program to Obtain Ordinates for NACA Airfoils*, NASA, Langley Research Center, Hampton Virginia
- DE ACEVEDO, H. y ROJAS, M., 2003, Curvas Características de Perfiles Aerodinámicos Serie SZ-2000, Tesis, Universidad Central de Venezuela, Tutor S. Zarea, Caracas.
- EKATERINARIS J. A., 2004, Prediction of active flow control performance on airfoils and wings, *Aerospace Science and Technology*,
- ERICKSON, G. E., 1995, High angle of attack aerodynamics, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 27, p. 45-88.



- FELICIEN F., FULLMER JR., 1944, Wind Tunnel Investigation of NACA 66(215)-216, 66,1-212, and 65<sub>1</sub>-212 Airfoils with 0.20-Airfoil-Chord Split Flaps, Langley Memorial Aeronautical Laboratory, Langley Field.
- FERRER M, CESAR, 2006, Características Geométricas y Aerodinámicas De Perfiles Utilizados En Diseño De Turbomaquinas Hidráulicas, UCV, Caracas
- FIGUEIRA, N. J. y VILASECA, U. M., 1981, Generación de Perfiles Aerodinámicos Utilizando Funciones Polinómicas, Tesis, Universidad Simón Bolívar Tutor S. Zarea, Caracas.
- FRANK, E., 1987, Calculo de la Capa Límite sobre Perfiles Eppler y Zarea Tesis, Universidad Simón Bolívar, Tutor S. Zarea, Caracas.
- GETAN, E., 1981, Estudio de Perfiles Aerodinámicos Definidos por Seis Parámetros, Tesis, Universidad Simón Bolívar, Tutor S. Zarea, Caracas.
- GOMEZ, ALVARO PINILLA, 2006 Aerodynamic Characteristics of Airfoils with Blunt Trailing Edge, *Revista de Ingenieria*, Universidad de los Andes. No 24.
- JOHANSEN, J., 2002, CFD Study of a NACA 63-415 Aerofoil Fitted with Stall Strips, Risø-R-1370(EN), Roskilde, September, pp. 52.
- KITSIOS V., KOTAPATI R. B., 2006, Numerical Simulation of Lift Enhancement on a NACA 0015 airfoil using ZNMF Jets, *Center for Turbulence Research*.
- KUETHE, A. M. y CHOW, CH., 1976, *Foundation of Aerodynamics*, John Wiley & Sons, Third Edition.
- LA GRECA, A., 1983, Flujo Rotacional Alrededor de un Perfil Aerodinámico, Tesis, Universidad Simón Bolívar, Tutor S. Zarea, Caracas.
- LI F. Y., FLAY G. J., 2003, *Cross-wind excitation of a 2D square prism with vibrating leading edge flaps*, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- LI F. Y., FLAY G. J., 2006, An Excitation model for a square prism with leading edge flaps in low turbulent flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- MARTIN P. B., MCALISTER K. W., 2003, Dynamic Stall Measurements and Computations for a VR-12 Airfoil with a Variable Droop Leading Edge, *American Helicopter Society 59<sup>th</sup> Annual Forum*.
- MARTINS F. y MONTOYA, L. J. L., 1991, Calculo de las Características Aerodinámicas de Perfiles Zarea Modificados, Tesis, Universidad Central de Venezuela, Tutor S. Zarea, Caracas.
- MATESCU D., ABDO M., 2005, Efficient second-order analytical solutions for airfoils in subsonic flows, *Aerospace Science and Technology*.

- MAUGHMER, M. D., et al, 2001, The Design and Testing of a Winglet Airfoil for Low-Speed Aircraft, *AIAA* 2001-2478. pp. 10.
- MCCROSKEY, W. J., 1981, The Phenomenon of Dynamic Stall, NASA
- MILEY, S. J., 1982, *A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications*, Texas A&M University, Texas, USA.
- NAKANO T., FUJISAWA N., 2007, Experimental Study on flow and noise Characteristics of NACA 0018 Airfoil, *Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics*.
- PANTIN, A. M. y ROJAS, H., 1978, Estudio Teórico Practico Sobre Perfiles Aerodinámicos, Tesis, Universidad Simón Bolívar, Tutor S. Zarea, Caracas.
- PALIKARAS, YAKINTHOS K., 2003, The effect of negative shear on the transitional separated flow around a semi-circular leading edge, *Heat and Fluid Flow*. No. 24.
- PELAEZ, U. F. A., 1985, Desarrollo de Perfiles Aerodinámicos Mediante Dos Curvas Generatrices Cerradas, Tesis, Universidad Central de Venezuela, Tutor S. Zarea, Caracas.
- PREMALATHA, RAMAMOORTHY P., 1991, Performance of an Airfoil at low Reynolds Number, National Aeronautical Laboratory, Project Document CF 9102, pp. 88.
- RODRIGUEZ, R. J. E., 1978, Generación de Perfiles Aerodinámicos, Tesis, Universidad Simón Bolívar, Tutor S. Zarea, Caracas.
- RODRIGUEZ, I., 1983, Generación de Perfiles Aerodinámicos Mediante el Método Zarea, Tesis, Universidad Central de Venezuela, Tutor S. Zarea, Caracas.
- SACKS, I. y URRESH, I., 1982, Estudio del flujo Alrededor de Perfiles Aerodinámicos Obtenidos por inversión Compleja, tesis, Universidad Simón Bolívar, Tutor S. Zarea, Caracas.
- SHOLZ, P. et al, 2006, Leading edge separation control by means of pulsed jet actuators, 3<sup>rd</sup> *AIAA Flow Control Conference*, 5-8 June, San Francisco.
- SARKAR S., VENKATRAMAN K., 2005, Influence of Pitching angle of incidence on the dynamic stall behaviour of a symmetric airfoil, *European Journal of Mechanics*.
- SHAN HUA, JIANG LI., 2003, Direct Numerical Simulation of flow separation around NACA 0012 Airfoil, *Computers & Fluids*
- SOMERS, D. M., AND MAUGHMER, M.D., 2003, Theoretical Aerodynamic Analyses of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines, NERL Subcontractor Report.
- SRINIVASA, P., 2000, Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics, Thesis, Indian Institute of Science, India, pp. 227.

- STAFF OF LANGLEY RESEARCH CENTER, 1979, Exploratory Study of the Effects of Wing Leading Edge Modifications on the Stall/Spin Behavior of a Light General Aviation Airplane, NASA TP 1589.
- TUCK, J.SORIA, 2004 Active Flow Control over a NACA 0015 Airfoil using a ZNMF Jet, 15<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Australia
- WINDTE J., SCHOLZ U., 2006, Validation of the RANS-simulation of laminar separation bubbles on airfoils, *Aerospace Science and Technology*.
- WILSON P. G., PAULEY L., 1998, Two and Three Dimensional Large-Eddy Simulation of a Transitional Separation Bubbles, *Physics Fluids*, Vol. 11, No 11.
- ZAREA, S., 1995, New Methods in Aero- hydrodynamic Profile Generation, III Congress on Fluid Mechanics, USB.
- ZAREA, S., 2001 Periodic Beltrami flows around cylindrical                      Recent Developments in Fluid Mechanics, Proceedings of LACAFLUM, pag. 131-137, Caracas.
- ZAREA, S., IRAUSQUIN. 2002. *Evaluación computacional de tres perfiles aerodinámicos serie SZ-1500*, Memorias del V Congreso Iberoamericano de Ingeniería                      ica, Chile.
- ZAREA, S., IRAUSQUIN. 2002. *Evaluación experimental de tres perfiles aerodinámicos serie SZ-1500 con borde de ataque modificado*, Memorias del V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Chile.
- ZAREA, S., et al, 2003, Evaluación experimental de ocho perfiles aerodinámicos serie SZ-1500 para bajos números de Reynolds, *Revista de la Fac. de Ingeniería*, UCV. V. 18, No3.