

# Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Aerodinâmica

## Cálculo Numérico das Características Aerodinâmicas de um Perfil Alar

### 1. Objectivos

Este trabalho tem três objectivos:

1. Realizar um exercício de *Verificação de um Código de Cálculo Numérico*.
2. Realizar um exercício de *Verificação de Soluções Numéricas*.
3. Realizar um exercício de *Validação*.

Os programas de cálculo disponíveis na página da UC no Fénix são:

- `asa2d.exe` — Cálculo das características aerodinâmicas de perfis alares em escoamento permanente (estacionário) e incompressível com um modelo de interacção viscosa-invíscida (método de painel para escoamento potencial combinado com cálculo integral de camada limite).
- `karmantrefzt_grid.exe` — Gerador de malha (painéis rectos) para perfis de Joukowski e de Kármán-Treftz.
- `grid_naca4.exe` — Gerador de malha (painéis rectos) para perfis NACA de 4 dígitos.
- `interpolation_airfoils.exe` — Gerador de malha (painéis rectos) para perfis definidos a partir de uma tabela de pontos.
- `karmantrefzt_solution.exe` — Cálculo da solução analítica de perfis de Joukowski e de Kármán-Treftz nos pontos de controle das malhas geradas pelo programa `karmantrefzt_grid.exe`.
- `errorBars.exe` — Estimativa da incerteza numérica baseada em estudos de refinamento de malha.

Podem ser utilizados quaisquer outros programas para geração de malha, cálculo das características aerodinâmicas de perfis alares e para estimativas de incerteza numérica, desde que devidamente referenciados/documentados.



	extradorso	“ponto de transição” em percentagem da corda.
	3 Fixa no intradorso	Linha seguinte tem de conter a abcissa $x$ do “ponto de transição” em percentagem da corda.
	4 Fixa nos dois lados do perfil	Linha seguinte tem de conter as abcissas $x$ dos “pontos de transição” em percentagem da corda. Primeiro valor para o extradorso e segundo para o intradorso.
Rey	Número de Reynolds.	
$\alpha$	Ângulo de ataque em graus.	
New $\alpha$	Opção para calcular novo ângulo de ataque: New $\alpha$ =1 regresso à linha anterior New $\alpha$ =0 final da execução do programa.	

Exemplo do ficheiro asa2d.in para um cálculo a ângulo de ataque de 0 e 4 graus:

```
foil_41.dat
0
6.0E6
0.
1
4.
0
```

b) Ficheiro ASCII name\_grid\_file

```
NBP
XBP(I),I=1,NBP
YBP(I),I=1,NBP
LABEL
```

Variável	Significado
NBP	Número de pontos da malha (número ímpar).
XBP(I),I=1,NBP	Abcissa $x$ dos pontos da malha em percentagem da corda. O primeiro e último pontos têm de coincidir com o bordo de fuga. Os pontos têm de percorrer o perfil no sentido horário começando e acabando no bordo de fuga, i.e. bordo de fuga – bordo de ataque pelo intradorso ( $x$ decrescente) seguido de bordo de ataque – bordo de fuga pelo extradorso ( $x$ crescente).
YBP(I),I=1,NBP	Ordenada $y$ dos pontos da malha em percentagem da corda com orientação idêntica às abcissas.
LABEL	Designação do perfil

Exemplo do ficheiro name\_grid\_file (foil\_41.dat):

```
41
100.000000000000 95.660517135142 90.670327631063 85.109225120146
79.066132191216 72.637678508385 65.926655693005 59.040373675296
52.088944797759 45.183523107743 38.434526993036 31.949873580736
25.833253131524 20.182471021963 15.087883826684 10.630954507660
6.882949813251 3.903800715722 1.741144108966 0.429561089775
-0.009975997375 0.429561089775 1.741144108966 3.903800715722
6.882949813251 10.630954507660 15.087883826684 20.182471021963
25.833253131524 31.949873580736 38.434526993036 45.183523107743
52.088944797759 59.040373675296 65.926655693005 72.637678508385
79.066132191216 85.109225120146 90.670327631063 95.660517135142
100.000000000000
0.000000000000 -0.300511374715 -0.627939623994 -0.890007772910
-1.189721218306 -1.445627705736 -1.692232321404 -1.966803867249
-2.231764777522 -2.490938320106 -2.720887720516 -2.884667113920
-2.990138229580 -3.009609527210 -2.928266020126 -2.794721579283
-2.525678270491 -2.159074279101 -1.703878632993 -0.870293379805
0.149661918692 1.111197859214 2.097737041260 3.084496976478
3.981029191120 4.826116447085 5.589188915168 6.208441022794
6.671763075309 6.954924253384 7.044488817974 6.942794640162
6.665367115835 6.239190458117 5.684764005368 4.997799257340
4.182148556433 3.274099492069 2.317807818913 1.146223511044
0.000000000000
```

Example

### 3.1.2 Ficheiros de saída

a) Ficheiro ASCII general\_output\_NCP.dat

Este ficheiro tem um nome que depende do número de painéis seleccionado (NCP=NBP-1) e contem as informações relativas a vários dos parâmetros calculados e à ocorrência de previsão de separação de camada limite.

Exemplo para o ficheiro general\_output\_41.dat:

Alfa= 0.000

Cl (Circulation)= 0.314

Cl (Pressure)= 0.305

Cd (Pressure)= 0.000750

CMc (Pressure)=-0.008

Cp min=-0.481

x/c Cp min=20.732

x/c Cp max= 0.006

CALCULO DE CAMADA LIMITE NO INTRADORSO  
TRANSICAO PREVISTA PELO METODO H-REX

4.42 LOCALIZACAO APROXIMADA DO PONTO

CALCULO DE CAMADA LIMITE NO EXTRADORSO  
TRANSICAO PREVISTA PELO METODO H-REX

30.25 LOCALIZACAO APROXIMADA DO PONTO

Cl (Circulation)= 0.282  
Cl (Pressure)= 0.272  
Cd (Pressure)= 0.000770  
CMc (Pressure)=-0.006  
Cp min=-0.458  
x/c Cp min=21.030  
x/c Cp max=-0.007

Alfa= 4.000

Cl (Circulation)= 0.793  
Cl (Pressure)= 0.799  
Cd (Pressure)= 0.002877  
CMc (Pressure)=-0.120  
Cp min=-1.727  
x/c Cp min= 1.349  
x/c Cp max= 0.558

CALCULO DE CAMADA LIMITE NO INTRADORSO  
TRANSICAO PREVISTA PELO METODO H-REX

76.52 | LOCALIZACAO APROXIMADA DO PONTO

CALCULO DE CAMADA LIMITE NO EXTRADORSO  
TRANSICAO PREVISTA PELO METODO H-REX

3.49 | LOCALIZACAO APROXIMADA DO PONTO

Cl (Circulation)= 0.691  
Cl (Pressure)= 0.692  
Cd (Pressure)= 0.002606  
CMc (Pressure)=-0.113  
Cp min=-1.464  
x/c Cp min= 1.162  
x/c Cp max= 0.432

b) Ficheiro ASCII panel\_α\_NCP.dat

Este ficheiro tem um nome que depende do ângulo de ataque ( $\alpha$ ) e do número de painéis seleccionado (NCP=NBP-1) e contém as distribuições do coeficiente de pressão ( $C_p$ ) e velocidade de transpiração obtidas em fluido perfeito e com a influência das camadas limite. O ficheiro contém 4 zonas (extradorso e intradorso em escoamento potencial e escoamento viscoso) com 4 colunas (com um formato TecPlot):

Variável	Significado
x/c	Abcissa x dos pontos de controle
y/c	Ordenada y dos pontos de controle
-Cp	Simétrico do coeficiente de pressão, $C_p = \frac{p - p_\infty}{1/2 \rho U_\infty^2}$ , nos pontos de controle
V <sub>w</sub>	Velocidade de transpiração nos pontos de controle

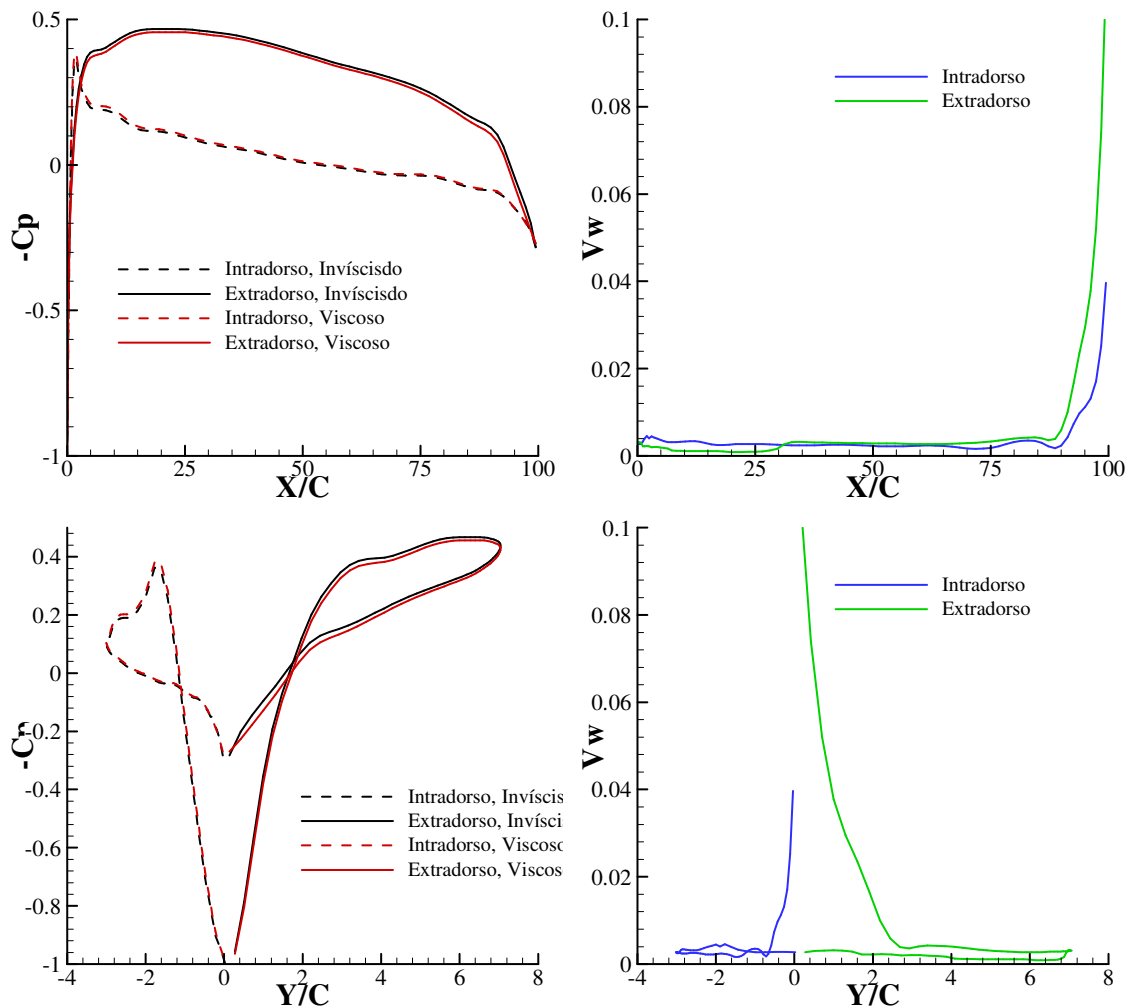


Figura 1 – Distribuições de coeficientes de pressão e velocidade de transpiração para um ângulo de ataque de 0°.

A informação contida no ficheiro panel\_0.00\_160.dat está ilustrada nas figura 1 que apresenta as distribuições de coeficiente de pressão (-Cp) e velocidade de transpiração ( $V_w$ ) em função de  $x/c$  e  $y/c$  para uma discretização de um perfil em 160 painéis e um ângulo de ataque de  $0^\circ$ .

c) Ficheiro ASCII camlim\_α\_NCP.dat

Este ficheiro tem um nome que depende do ângulo de ataque ( $\alpha$ ) e do número de painéis seleccionado (NCP=NBP-1) e contém os parâmetros integrais dos cálculos de camada limite no extradorso e intradorso do perfil. O ficheiro contém 2 zonas (intradorso e extradorso) com 4 colunas (com um formato TecPlot):

Variável	Significado
$s/c$	Distância ao ponto de estagnação
$C_f$	Coeficiente de tensão de corte superficial
$\delta^*/c$	Espessura de deslocamento
$\theta/c$	Espessura de quantidade de movimento
H	Factor de forma

A informação contida no ficheiro camlim\_0.00\_160.dat está ilustrada nas figura 2 que apresenta as evoluções de coeficiente de tensão de corte superficial  $C_f$ , espessura de deslocamento  $\delta^*/c$ , espessura de quantidade de movimento  $\theta/c$  e factor de forma H para as camadas limite de um perfil discretizado em 160 painéis e um ângulo de ataque de  $0^\circ$ .

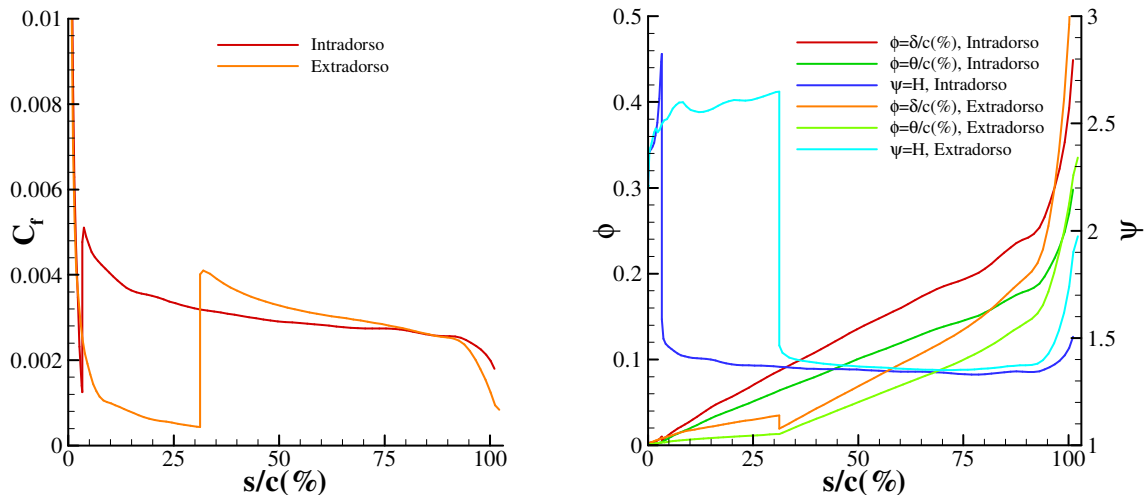


Figura 2 – Evoluções de coeficiente de tensão de corte superficial  $C_f$ , espessura de deslocamento  $\delta^*/c$ , espessura de quantidade de movimento  $\theta/c$  e factor de forma H para as camadas limite para um ângulo de ataque de  $0^\circ$ .

d) Ficheiro ASCII resint\_potential\_α.dat

Este ficheiro tem um nome que depende do ângulo de ataque ( $\alpha$ ) e contém os coeficientes integrais obtidos no cálculo de escoamento potencial. O ficheiro contém 5 colunas e uma linha por cada cálculo feito para o mesmo ângulo de ataque.

Variável	Significado
NCP	Número de painéis.
Clj	Coeficiente de sustentação obtido a partir da circulação.
Clp	Coeficiente de sustentação obtido a partir da integração do coeficiente de pressão.
Cdp	Coeficiente de resistência obtido a partir da integração do coeficiente de pressão.
Cmc	Coeficiente de momento de picada em torno do centro do perfil obtido a partir da integração do coeficiente de pressão.

e) Ficheiro ASCII resloc\_potential\_α.dat

Este ficheiro tem um nome que depende do ângulo de ataque ( $\alpha$ ) e contém coeficientes locais obtidos no cálculo de escoamento potencial. O ficheiro contém 4 colunas e uma linha por cada cálculo feito para o mesmo ângulo de ataque.

Variável	Significado
NCP	Número de painéis.
Cp <sub>min</sub>	Coeficiente de pressão mínimo.
(x/c)Cp <sub>min</sub>	Abcissa do ponto de coeficiente de pressão mínimo em percentagem da corda.
(x/c)Cp=1	Abcissa do ponto de estagnação.

f) Ficheiro ASCII resint\_final\_α.dat

Este ficheiro tem um nome que depende do ângulo de ataque ( $\alpha$ ) e contém os coeficientes integrais obtidos do cálculo com a influência da camada limite. O ficheiro contém 8 colunas e uma linha por cada cálculo feito para o mesmo ângulo de ataque.

Variável	Significado
NCP	Número de painéis.
Clj	Coeficiente de sustentação obtido a partir da circulação.
Clp	Coeficiente de sustentação obtido a partir da integração do coeficiente de pressão.
Cdp	Coeficiente de resistência obtido a partir da integração do coeficiente de pressão.
Cda	Coeficiente de resistência obtido a partir da integração da tensão de corte na parede.
Cd	Soma de Cdp e Cda.



Cd (SY)	Coeficiente de resistência de perfil obtido pela fórmula de Squire-Young.
Cmc	Coeficiente de momento de picada em torno do centro do perfil obtido a partir da integração do coeficiente de pressão.

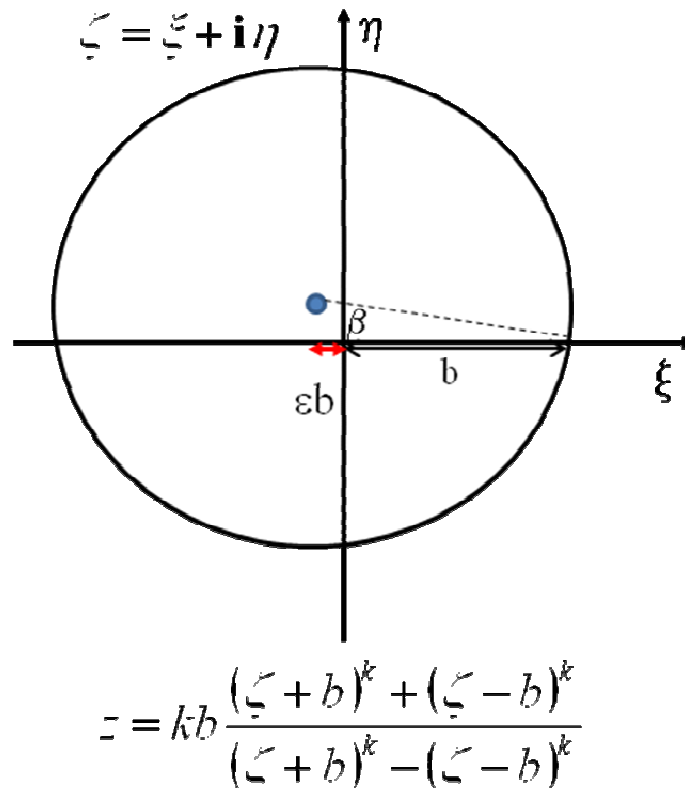
g) Ficheiro ASCII resloc\_final\_α.dat

Este ficheiro tem um nome que depende do ângulo de ataque ( $\alpha$ ) e contém coeficientes locais obtidos do cálculo com a influência da camada limite. O ficheiro contém 6 colunas e uma linha por cada cálculo feito para o mesmo ângulo de ataque.

Variável	Significado
NCP	Número de painéis.
$C_{p_{\min}}$	Coeficiente de pressão mínimo.
$(x/c)C_{p_{\min}}$	Abcissa do ponto de coeficiente de pressão mínimo em percentagem da corda.
$(x/c)C_p=1$	Abcissa do ponto de estagnação.
$(x_{\text{tra}}/c)_{\text{int}}$	Abcissa do “ponto de transição” da camada limite do intradorso.
$(x_{\text{tra}}/c)_{\text{ext}}$	Abcissa do “ponto de transição” da camada limite do extradorso.

### 3.2 Programa karmantreftz\_grid.exe

Este programa gera malhas de painéis rectos para perfis de Joukowski e de Kármán-Treftz a partir da transformação conforme de um cilindro de raio 1.



### 3.2.1 Ficheiros de entrada

Standard input (terminal ou ficheiro redireccionado)

beta  
epsilon  
kexp  
NBP  
name\_grid\_file  
new\_grid

Variável	Significado
Beta ( $\beta$ )	Ângulo (em graus) que define a coordenada imaginária do centro do cilindro relacionado com a flecha do perfil.
Epsilon ( $\epsilon$ )	Fracção de b (parâmetro da transformação) que define a coordenada real do centro do cilindro relacionado a espessura do perfil.
kexp( $k$ )	Expoente da transformação que define o ângulo do bordo de fuga $\tau=(2-kexp)\pi$ . kexp=2 – Perfil de Joukowski kexp<2 – Perfil de Kármán-Treftz
NBP	Número de pontos para a malha (número de painéis mais 1). Tem de ser um número ímpar.
name_grid_file	Nome do ficheiro ASCII que contem as coordenadas (x,y) dos pontos da malha. (estrutura do ficheiro name_grid_file apresentada em baixo)
new_grid	Opção para gerar nova malha: new_grid=1 regresso à linha NBP. new_grid=0 final da execução do programa.

Exemplo do ficheiro grid\_airfoil.in:

```
4.  
0.04  
1.98  
51  
foil_51  
1  
61  
foil_61  
0
```

### 3.2.2 Ficheiros de saída

a) Ficheiro ASCII name\_grid\_file.dat

```
NBP  
XBP(I),I=1,NBP
```

YBP(I),I=1,NBP  
 LABEL

Variável	Significado
NBP	Número de pontos da malha (número de painéis mais 1).
XBP(I),I=1,NBP	Abcissa $x$ dos pontos da malha em percentagem da corda. O primeiro e último pontos têm de coincidir com o bordo de fuga. Os pontos têm de percorrer o perfil no sentido horário começando e acabando no bordo de fuga, i.e. bordo de fuga – bordo de ataque pelo intradorso ( $x$ decrescente) seguido de bordo de ataque – bordo de fuga pelo extradorso ( $x$ crescente).
YBP(I),I=1,NBP	Ordenada $y$ dos pontos da malha em percentagem da corda com orientação idêntica à definida em cima para $x$ .
LABEL	Designação do perfil

Exemplo do ficheiro name\_grid\_file.dat (foil\_51.dat):

51

```

100.000000000000 99.585821242811 98.359360573468 96.335636816169
93.540433040728 90.014410206452 85.813746173392 81.009556727584
75.686423342680 69.940189714280 63.875199638359 57.601182651879
51.230014368632 44.872574017091 38.635891717344 32.620728619342
26.919673824918 21.615783300501 16.781736274269 12.479449365890
8.760070263436 5.664271526463 3.222782205846 1.457138520712
0.380728387125 0.000000000000 0.372438679813 1.536066395629
3.449601844295 6.067501558328 9.339010999897 13.208078329212
17.613590873197 22.489726767914 27.766359852127 33.369496313866
39.221732461159 45.242725271547 51.349667810047 57.457762764554
63.480690416484 69.331072990898 74.920945849787 80.162257358181
84.967432718139 89.250050478201 92.925688610291 95.912987148601
98.134907447847 99.519869301952 100.000000000000
0.000000000000 0.042229176611 0.157278082778 0.326278548586
0.527126784970 0.735734034259 0.927852750396 1.081050152308
1.176596042343 1.201058409762 1.147435775838 1.015711174555
0.812783220316 0.551803592246 0.251015386250 -0.067766421778
-0.380867736216 -0.664496604844 -0.896367368244 -1.057093562278
-1.131271616463 -1.108210496741 -0.982282957990 -0.752859098118
-0.423621837443 0.000000000000 0.568596791420 1.234650662238
1.969554717905 2.739184557835 3.507679482712 4.239539259078
4.901323883535 5.463115888340 5.899766944596 6.191925972934
6.326840289770 6.298919141555 6.110047189330 5.769633582121
5.294380414857 4.707753166498 4.039136036284 3.322658203748
2.595684651294 1.896979514575 1.264573641782 0.733404441718
0.332850974452 0.084384754682 0.000000000000
51 panels

```

b ) Ficheiro ASCII tec\_name\_grid\_file.dat

Este ficheiro destina-se a representação gráfica (com o programa TecPlot) e contém uma zona com os pontos que definem o perfil. A figura 3 apresenta um perfil de Kármán-Treftz com 50 paineis (correspondente ao ficheiro foil\_51.dat).

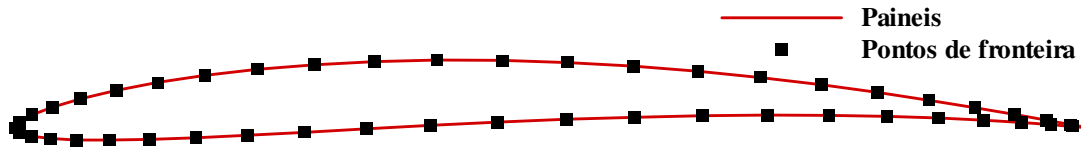


Figura 3 - Exemplo com 50 paineis para com  $\beta=4^\circ$ ,  $\varepsilon=0.04$  e  $k_{exp}=1.95$ .

### 3.3 Programa grid\_naca4.exe

Este programa gera malhas de paineis rectos para perfis NACA da série de 4 dígitos, NACA ABCD.

#### 3.3.1 Ficheiros de entrada

Ficheiro grid\_naca4.in

A  
B  
CD  
NBP  
name\_grid\_file  
new\_grid

Variável	Significado
A	Flecha relativa máxima em percentagem da corda.
B	Abcissa do ponto de flecha máxima vezes 10 em percentagem da corda.
CD	Espessura máxima em percentagem da corda.
NBP	Número de pontos para a malha (número de paineis mais 1). Tem de ser um número ímpar.
name_grid_file	Nome do ficheiro ASCII que contém as coordenadas (x,y) dos pontos da malha. (estrutura do ficheiro name_grid_file apresentada em baixo)
new_grid	Opção para gerar nova malha: new_grid=1 regresso à linha NBP. new_grid=0 final da execução do programa.

Exemplo do ficheiro grid\_airfoil.in:

```
2.
4.
12.
51
foil_51
1
61
foil_61
0
```

### 3.3.2 Ficheiros de saída

b) Ficheiro ASCII name\_grid\_file.dat

```
NBP
XBP(I),I=1,NBP
YBP(I),I=1,NBP
LABEL
```

Variável	Significado
NBP	Número de pontos da malha (número de painéis mais 1).
XBP(I),I=1,NBP	Abcissa $x$ dos pontos da malha em percentagem da corda. O primeiro e último pontos têm de coincidir com o bordo de fuga. Os pontos têm de percorrer o perfil no sentido horário começando e acabando no bordo de fuga, i.e. bordo de fuga – bordo de ataque pelo intradorso ( $x$ decrescente) seguido de bordo de ataque – bordo de fuga pelo extradorso ( $x$ crescente).
YBP(I),I=1,NBP	Ordenada $y$ dos pontos da malha em percentagem da corda com orientação idêntica à definida em cima para $x$ .
LABEL	Designação do perfil

Exemplo do ficheiro name\_grid\_file.dat (foil\_51.dat):

```
51
99.991618604674 95.003127519428 89.823994776893 84.490724314722
79.040701164407 73.511945310350 67.942848240646 62.371896195178
56.837387691009 51.377155165493 46.028301076516 40.826957418420
35.842834612035 31.080664728866 26.563531437960 22.319701611398
18.375973242233 14.757677476194 11.488640374506 8.591087936087
6.085487818902 3.990332459821 2.321879023882 1.093870040249
0.317263317492 0.000000000000 0.150355449241 0.773325017017
1.867032825634 3.426151508515 5.441784495417 7.901354724731
10.788527530814 14.083194880361 17.761543101579 21.796217540755
26.156586580390 30.809095940601 35.717694038650 40.837631054632
```

46.102766340157	51.509395486420	57.018208500669	62.589367867580
68.182807743802	73.758516458670	79.276807447023	84.698585100647
89.985611532682	95.100778022581	100.008381395326	
-0.125720929890	-0.481936627953	-0.840930667782	-1.202325482756
-1.565151962334	-1.927349188181	-2.285370369655	-2.633946669068
-2.966043342472	-3.273021207747	-3.544993298398	-3.771344298048
-3.953462082206	-4.100620979199	-4.199519197408	-4.237675153414
-4.204464970249	-4.091497743403	-3.892775482365	-3.604637185031
-3.225509415554	-2.755505554642	-2.195930569467	-1.548756327599
-0.816133495834	0.000000000000	0.862758705438	1.733296822462
2.603854890366	3.462776304943	4.295187892605	5.083881035537
5.810322141721	6.455712530129	7.002016549943	7.432883116979
7.734399221825	7.895632998819	7.908946659296	7.770574616164
7.504114743768	7.127522818652	6.647654066501	6.072414650701
5.410345575298	4.670317236343	3.861365252584	2.992677451092
2.073720247873	1.114472734730	0.125720929890	

NACA 2412

b ) Ficheiro ASCII tec\_name\_grid\_file.dat

Este ficheiro destina-se a representação gráfica (com o programa TecPlot) e contém uma zona com os pontos que definem o perfil. A figura 4 apresenta um perfil NACA 2412 com 50 paineis (correspondente ao ficheiro foil\_51.dat).

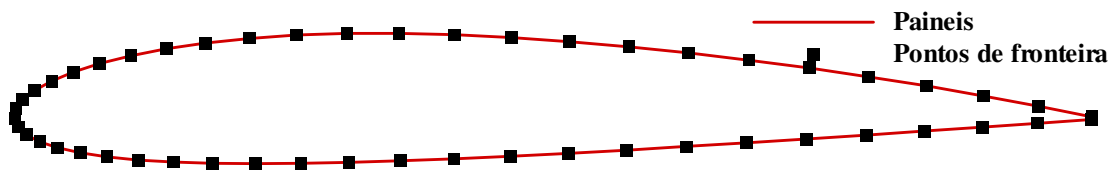


Figura 4 - Exemplo com 50 paineis para a um perfil NACA 2412.

### 3.4 Programa interpolation\_airfoils.exe

Este programa gera malhas para utilização em métodos de painel bi-dimensionais. O perfil é definido por um conjunto de pontos de coordenadas  $(x,y)$  (fornecidos num dos ficheiros de entrada) que servem de base a três polinómios interpoladores que definem analiticamente o perfil:

- Polinómio do 4º grau ( $x=f(y)$ ) na zona do bordo de ataque.
- Spline cúbico ( $y=f(x)$ ) para o extradorso.
- Spline cúbico ( $y=f(x)$ ) para o intradorso.

O número de painéis gerados no extradoso e intradorso é idêntico e os pontos da malha têm uma distribuição tipo coseno ao longo da linha que une o bordo de fuga ao ponto do polinómio interpolador do bordo de ataque que apresenta a menor abcissa  $x$ .

### 3.4.1 Ficheiros de entrada

a) Standard input (terminal ou ficheiro redireccionado)

```
name_airfoil_file
iopt
NBP
name_grid_file
new_grid
```

Variável	Significado
name_airfoil_file	Nome do ficheiro ASCII que contem as coordenadas $(x,y)$ dos pontos que definem o perfil. (estrutura do ficheiro name_airfoil_file apresentada em baixo).
iopt	Opção para a estrutura do ficheiro name_airfoil_file 0 -> N X(I),I=1,N Y(I),I=1,N 1 -> N X(I),Y(I) (N linhas)
NBP	Número de pontos para a malha (número de painéis mais 1). Tem de ser um número ímpar.
name_grid_file	Nome do ficheiro ASCII que contem as coordenadas $(x,y)$ dos pontos da malha. (estrutura do ficheiro name_grid_file apresentada em baixo)
new_grid	Opção para gerar nova malha: new_grid=1 regresso à linha NBP. new_grid=0 final da execução do programa.

Exemplo do ficheiro grid\_airfoil.in:

```
n66209.in
0
51
foil_51
1
61
foil_61
0
```

b) Ficheiro ASCII name\_airfoil\_file:

iopt=0	iopt=1
N	N
X(I),I=1,N	X(I),Y(I) (N linhas)
Y(I),I=1,N	LABEL
LABEL	

Variável	Significado
N	Número de pontos que definem o perfil.
X(I),I=1,N	Abcissa $x$ dos pontos que definem o perfil. O primeiro e último pontos têm de coincidir com o bordo de fuga. Os pontos têm de percorrer o perfil no sentido horário começando e acabando no bordo de fuga, i.e. bordo de fuga – bordo de ataque pelo intradorso ( $x$ decrescente) seguido de bordo de ataque – bordo de fuga pelo extradorso ( $x$ crescente).
Y(I),I=1,N	Ordenada $y$ dos pontos que definem o perfil com ordem idêntica à definida em cima para $x$ .
LABEL	Designação do perfil.

Exemplo do ficheiro name\_airfoil\_file (n66209.in):

```

51
100.000    94.9825    89.9664    84.9556    79.9501    74.9497
69.9538    64.9617    59.9729    54.9860    50.0000    45.0144
40.0288    35.0428    30.0563    25.0687    20.0794    15.0877
10.0917    7.5913 0    5.08800    2.57960    1.32120    0.813700
0.557400    0.000000E+000 0.442600    0.686300    1.17880    2.42040
4.91200    7.40870    9.90830    14.9123    19.9206    24.9313
29.9437    34.9572    39.9712    44.9856    50.0000    55.0140
60.0271    65.0383    70.0462    75.0503    80.0499    85.0444
90.0336    95.0175    100.000
0.000000E+000 -5.7400E-002 -0.444800    -0.936300    -1.46380    -1.98080
-2.45460    -2.85870    -3.13000    -3.28470    -3.37130    -3.40310
-3.38460    -3.31720    -3.20070    -3.03140    -2.80340    -2.50360
-2.10560    -1.85850    -1.56100    -1.17880    -0.916600    -0.748500
-0.630900    0.000000E+000 0.731100    0.889100    1.13050    1.55090
2.19290    2.70640    3.14030    3.84910    4.39620    4.82140
5.14510    5.37800    5.52680    5.59350    5.57770    5.47510
5.27230    4.91960    4.39900    3.77070    3.05660    2.28180
1.47960    0.689300    0.000000E+000
NACA 66209

```

### 3.4.2 Ficheiros de saída

a) Ficheiro ASCII name\_grid\_file.dat

NBP



XBP(I),I=1,NBP  
 YBP(I),I=1,NBP  
 LABEL

Variável	Significado
NBP	Número de pontos da malha (número de painéis mais 1).
XBP(I),I=1,NBP	Abcissa $x$ dos pontos da malha em percentagem da corda com orientação idêntica à do ficheiro name_airfoil_file.
YBP(I),I=1,NBP	Ordenada $y$ dos pontos da malha em percentagem da corda com orientação idêntica à do ficheiro name_airfoil_file.
LABEL	Designação do perfil

Exemplo do ficheiro name\_grid\_file.dat (foil\_51.dat):

51  
 100.000000000000 95.051779144860 89.904448916028 84.594114136708  
 79.158022989908 73.634305749195 68.061707322228 62.479315483066  
 56.926286699517 51.441571478652 46.063641156984 40.830218051680  
 35.778010865616 30.942457202196 26.357474996028 22.055224602983  
 18.065883218407 14.417433205773 11.135465820513 8.243001705744  
 5.760329418998 3.704863122570 2.091020435679 0.930121305228  
 0.230308604513 -0.003508983185 0.230308604513 0.930121305228  
 2.091020435679 3.704863122570 5.760329418998 8.243001705744  
 11.135465820513 14.417433205773 18.065883218407 22.055224602983  
 26.357474996028 30.942457202196 35.778010865616 40.830218051680  
 46.063641156984 51.441571478652 56.926286699517 62.479315483066  
 68.061707322228 73.634305749195 79.158022989908 84.594114136708  
 89.904448916028 95.051779144860 100.000000000000  
 0.000000000000 -0.054083086644 -0.450608517753 -0.973540901180  
 -1.547525904990 -2.110369081664 -2.619556440945 -3.010986549237  
 -3.234892094627 -3.352063831350 -3.400710611018 -3.390886366458  
 -3.330186936010 -3.225125538874 -3.080466163910 -2.901295657444  
 -2.692344176770 -2.456569428539 -2.198398283441 -1.926660076811  
 -1.648001735694 -1.361394980502 -1.091858154603 -0.793097235308  
 -0.406493782650 0.059591088590 0.548629663004 1.018227796039  
 1.453674239115 1.900455545979 2.379451127293 2.858404594742  
 3.332047488259 3.787057360026 4.209570110748 4.590756624388  
 4.923280182472 5.198476716614 5.408017665153 5.544032291017  
 5.597176956240 5.557258179029 5.411869393040 5.121278270067  
 4.621783831431 3.957745395348 3.189429531370 2.353222193771  
 1.500556973345 0.684159437184 0.000000000000

Interpolated

b) Ficheiro ASCII tec\_name\_grid\_file.dat

Este ficheiro destina-se a representação gráfica (com o programa TecPlot) e contém duas zonas:

1. Pontos que definem o perfil.
2. Pontos da malha gerada.

A figura 5 apresenta um gráfico com os pontos do ficheiro foil\_161.dat e uma malha interpolada com 161 pontos (160 paineis).

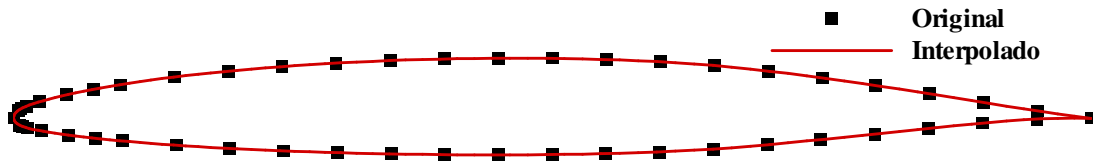


Figura 5 - Exemplo de malha interpolada para o perfil NACA 66209 com 160 paineis.

### 3.5 Programa karmantreftz\_solution.exe

Este programa calcula a solução analítica do coeficiente de pressão nos pontos de controle das malhas geradas com o programa karmantreftz\_grid.exe para perfis de Joukowski e de Kármán-Treftz.

#### 3.5.1 Ficheiro de entrada

Standard input (terminal ou ficheiro redireccionado)

beta  
epsilon  
kexp  
alfa  
NBP  
new\_grid

Variável	Significado
Beta ( $\beta$ )	Ângulo (em graus) que define a coordenada imaginária do centro do cilindro relacionado com a flecha do perfil.
Epsilon ( $\epsilon$ )	Fracção de b (parâmetro da transformação) que define a coordenada real do centro do cilindro relacionado a espessura do perfil.
Kexp	Expoente da transformação que define o ângulo do bordo de fuga $\tau=(2-kexp)\pi$ . kexp=2 – Perfil de Joukowski

	kexp<2 – Perfil de Kármán-Treftz
alfa ( $\alpha$ )	Ângulo de ataque (em graus).
NBP	Número de pontos para a malha (número de painéis mais 1). Tem de ser um número ímpar.
new_grid	Opção para gerar nova malha: new_grid=1 regresso à linha NBP. new_grid=0 final da execução do programa.

Exemplo do ficheiro grid\_airfoil.in:

```
4.
0.04
1.98
0.
51
1
61
0
```

### 3.5.2 Ficheiro de saída

Ficheiro ASCII ktrefz\_α\_NCP.dat

Este ficheiro tem um nome que depende do ângulo de ataque ( $\alpha$ ) e do número de painéis seleccionado (NCP=NBP-1) e contém as distribuições de coeficiente de pressão ( $C_p$ ) e o coeficiente de sustentação obtidos em fluido perfeito a partir de um cilindro de raio 1 e uma transformação conforme. O ficheiro contém 2 zonas (extradorso e intradorso) com 4 colunas (com um formato TecPlot).

Variável	Significado
x/c	Abcissa x dos pontos de controle
y/c	Ordenada y dos pontos de controle
-Cp	Simétrico do coeficiente de pressão, $C_p = \frac{p - p_\infty}{1/2 \rho U_\infty^2}$ , nos pontos de controle
V <sub>w</sub>	Coefficiente de sustentação (igual em todas as linhas)

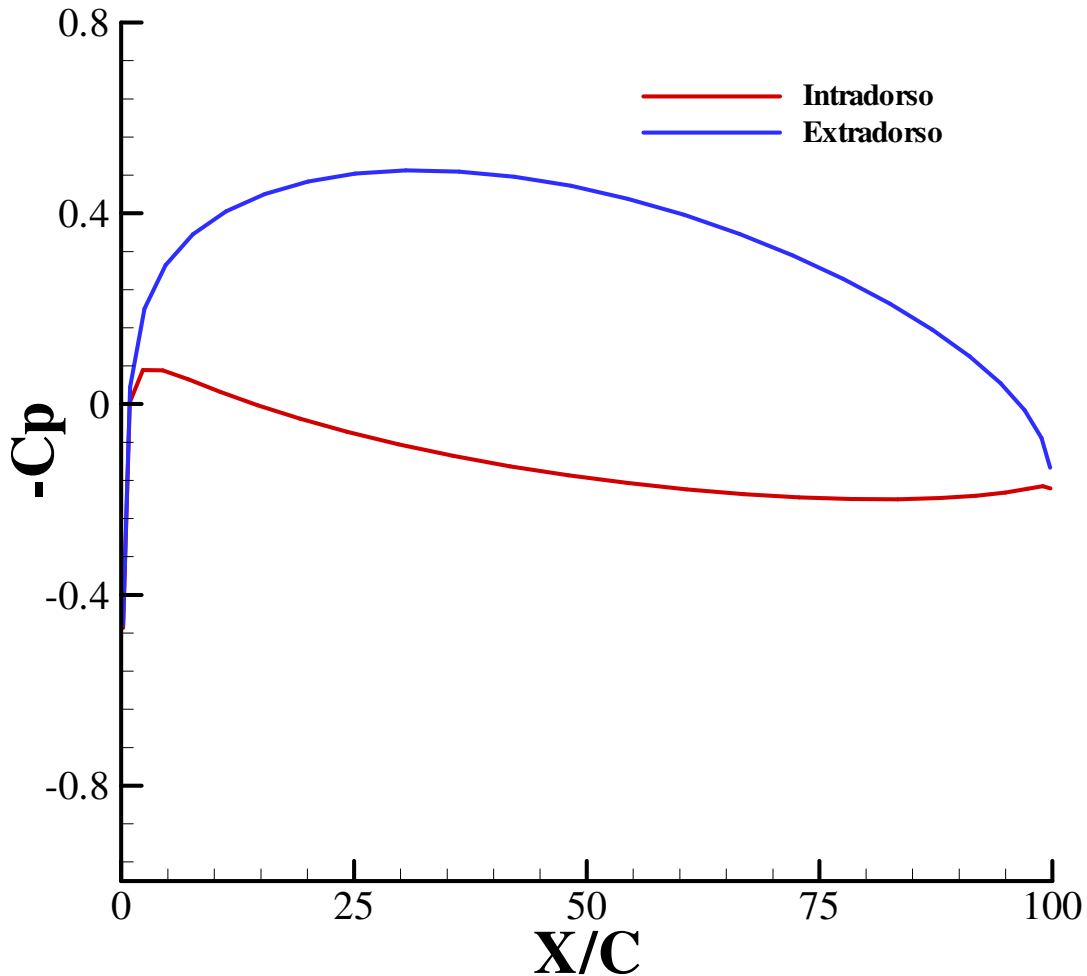


Figura 6 - Distribuição de pressão analítica na malha de 50 painéis com  $\beta=4^\circ$ ,  $\varepsilon=0.04$ ,  $k_{exp}=1.95$  e  $\alpha=0^\circ$ .

A figura 6 ilustra a distribuição de pressão para uma malha de 50 painéis com  $\beta=4^\circ$ ,  $\varepsilon=0.04$ ,  $k_{exp}=1.95$  e  $\alpha=0^\circ$ .

### 3.6 Programa error\_bars.exe

O programa error\_bars.exe estima a incerteza numérica  $U(\phi)$  de um parâmetro  $\phi$  calculado num estudo de refinamento de malha com um número mínimo de 4 malhas. A incerteza é obtida a partir de uma estimativa do erro de discretização  $e(\phi)$  e de um factor de segurança  $F_s$ ,

$$U(\phi) = F_s e(\phi).$$

O erro de discretização de uma solução numérica  $\phi_i$  é estimado a partir de um desenvolvimento em série de potências em que se retem apenas o primeiro termo

$$e(\phi) = \phi_i - \phi_o = \alpha h_i^p.$$

$\phi_o$  é a estimativa da solução exacta,  $\alpha$  é uma constante,  $p$  é a ordem de convergência e  $h_i$  é o tamanho típico da malha dado por

$$h_i = \frac{1}{NCP} = \frac{1}{NBP - 1},$$

o que equivale a

$$e(\phi) = \phi_i - \phi_o = \alpha^* \left( \frac{h_i}{h_1} \right)^p$$

com

$$\left( \frac{h_i}{h_1} \right) = \left( \frac{NCP_1}{NCP_i} \right).$$

No caso de a ordem de convergência não pertencer ao intervalo  $0.5 \leq p \leq 2$ , o erro de discretização é estimado a partir de uma das seguintes alternativas:

$$e(\phi) = \phi_i - \phi_o = \alpha h_i,$$

$$e(\phi) = \phi_i - \phi_o = \alpha h_i^2,$$

$$e(\phi) = \phi_i - \phi_o = \alpha_1 h + \alpha_2 h_i^2;$$

A alternativa escolhida é a que conduz ao menor desvio padrão da aproximação de mínimos quadrados utilizada.

### 3.6.1 Ficheiros de entrada

“Ficheiro ASCII” a partir do “terminal”

name\_output\_file  
name\_input\_file  
order  
number\_var  
ndisc  
igrid,number\_grids (ndisc lines)

Variável	Significado
name_output_file	Nome dos ficheiros de saída tec_name_output_file_i.dat.
name_input_file	Nome dos ficheiros de dados de entrada (exemplos : resint_potential_α.dat, resloc_potential_α.dat, resint_final_α.dat or resloc_final_α.dat)

Order	Organização do ficheiro de entrada: order=0 → mais fina para a mais esparsa order≠0 → mais esparsa para a mais fina
number_var	Número de colunas do ficheiro name_input_file menos 1
Ndisc	Número de cálculos da barra de incerteza
Igrid	Índice da malha para calcular incerteza (1 é sempre a malha mais fina)
Number_grids	Número de malha (linhas do ficheiro name_input_file) para o cálculo da incerteza numérica para a malha igrig.

Exemplo do ficheiro de entrada:

```
respot_0
resint_potential_0.00.dat
1
4
3
1 6
6 6
11 6
```

Ficheiro resint\_potential\_0.00.dat

```
50 0.241968721 0.235087126 0.000790242 -0.009781750
60 0.243790135 0.238267004 0.000651058 -0.009616468
70 0.245095581 0.240502581 0.000558313 -0.009507931
80 0.246085078 0.242165521 0.000492319 -0.009433625
90 0.246867746 0.243456095 0.000443041 -0.009381023
100 0.247510001 0.244493484 0.000404978 -0.009342909
120 0.248520836 0.246076837 0.000350107 -0.009294030
140 0.249303743 0.247251689 0.000312678 -0.009266789
160 0.249950022 0.248181090 0.000285729 -0.009251712
180 0.250506639 0.248950899 0.000265493 -0.009244102
200 0.251001924 0.249611557 0.000249807 -0.009241244
240 0.251864076 0.250710219 0.000227278 -0.009243432
280 0.252606064 0.251612216 0.000211977 -0.009251247
320 0.253257513 0.252377927 0.000201015 -0.009261320
360 0.253835231 0.253040165 0.000192823 -0.009272050
400 0.254349202 0.253619045 0.000186524 -0.009282636
```

Estes dois ficheiros conduzem a 4 ficheiros de saída que contêm três estimativas da incerteza numérica das quatro quantidades incluídas no ficheiro resint\_potential\_0.00.dat. As malhas escolhidas são a 1ª (NCP=400), 6ª (NCP=200) e 11ª (NCP=100) e as três barras de erro são baseadas em 6 malhas (que cobrem sempre uma razão de refinamento igual 2).

### 3.6.2 Ficheiros de saída

Ficheiros ASCII tec\_name\_output\_file\_i.dat

Este ficheiros contém 2+ndisc zonas:

1. Variável  $\phi$  em função de  $\left(\frac{h_i}{h_1}\right)$ .
2. Curva ajustada para a estimativa do erro de discretização (da primeira barra de erro estimada).
3. Solução para as ndisc malhas seleccionadas e respectiva incerteza numérica.

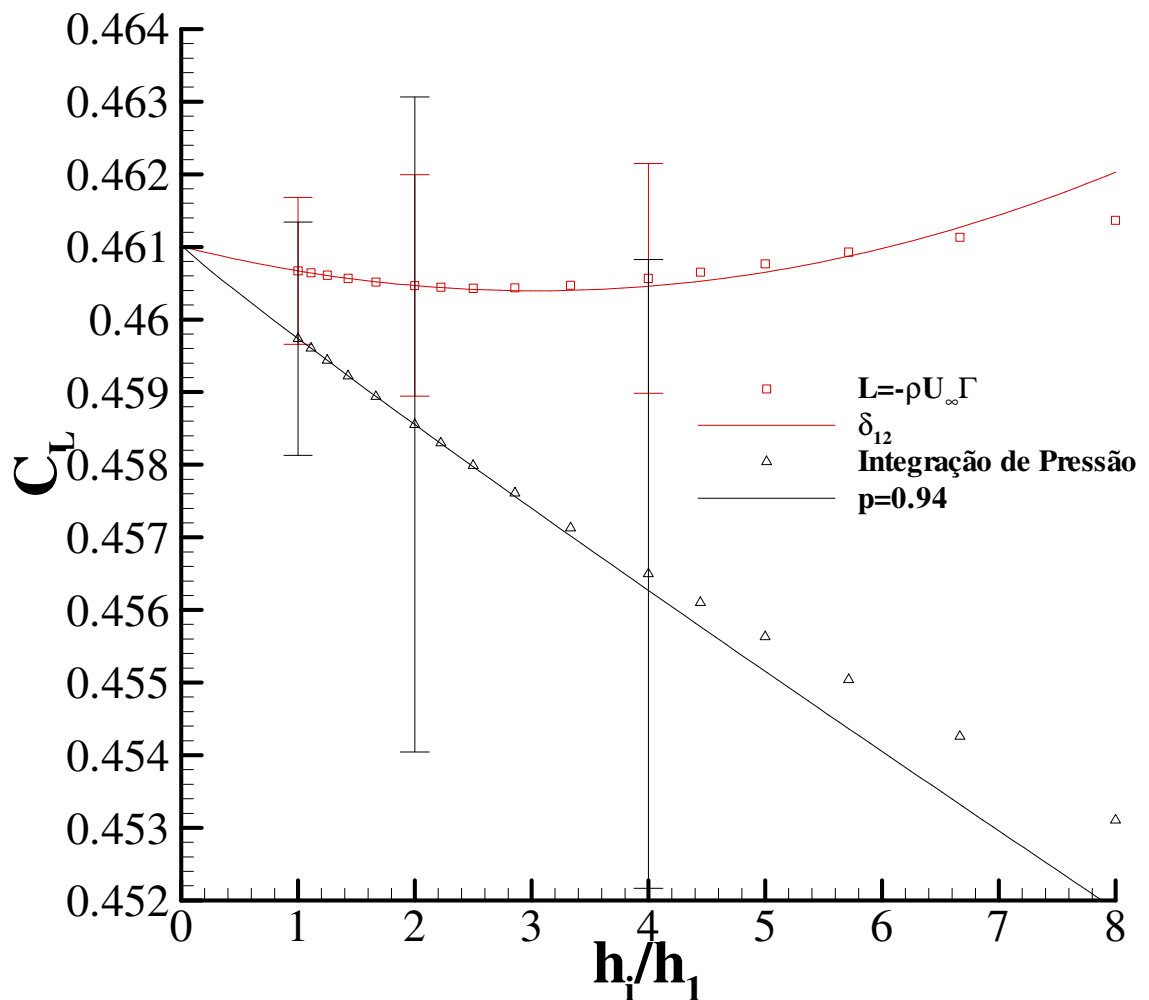


Figura 7 – Convergência com o refinamento de malha do coeficiente de sustentação  $C_l$  obtido da equação de Kutta-Joukowski (KJ) e integração do coeficiente de pressão ( $C_p$ ) para o escoamento a ângulo de ataque nulo em torno de um perfil de Kármán-Treftz.

A figura 7 apresenta a convergência do coeficiente de sustentação com o refinamento da malha para um perfil de Kármán-Treftz a um ângulo de ataque de  $0^\circ$ . A figura apresenta os seguintes resultados:

- Valores obtidos pelo método de painel (em fluido perfeito) a partir da circulação e da integração da distribuição de pressão.
- Linhas ajustadas pelo desenvolvimento em série de potências que descrevem o coeficiente de sustentação em função da dimensão típica da malha. As linhas apresentadas são baseadas nos resultados das 6 malhas mais refinadas.
- Barras de incerteza para  $h_i/h_1=1$ ,  $h_i/h_1=2$  e  $h_i/h_1=4$ . Para a obtenção das barras de incerteza utilizaram-se 6 malhas tal como indicado acima no exemplo de ficheiro de entrada.