

## Capítulo 5

# APRESENTAÇÃO DOS CASOS ESTUDADOS

## 5.1 – INTRODUÇÃO

Com o intuito de avaliar a aplicabilidade dos algoritmos de Busca Aleatória Controlada (CRS) no projeto inverso de grades de turbomáquinas, são apresentados neste capítulo três casos de estudo. No primeiro caso, tem-se por objetivo testar a capacidade dos algoritmos CRS de recuperar um perfil aerodinâmico cuja geometria é representada com exatidão pela parametrização geométrica descrita no Capítulo 3. No segundo caso, busca-se reproduzir uma situação de projeto inverso tratada na literatura através de outro algoritmo de otimização (Rogalsky *et al.*, 1999). No terceiro caso, testa-se a capacidade dos algoritmos CRS de recuperar um perfil de uma grade real, partindo de dados experimentais da distribuição de pressões no contorno. Nesse último caso, é feita uma comparação entre os perfis obtidos através de cálculos com escoamento puramente potencial e com o ajuste de Gostelow (conforme descrito no Capítulo 2).

Em todos os casos, três diferentes algoritmos CRS são comparados: (i) uma versão do algoritmo CRS6 de Ali *et al.* (1997a), sem busca local baseada em distribuição  $\beta$  de probabilidades, aqui denominado **CRSI**; (ii) o próprio algoritmo CRS6, que inclui a busca local, aqui denominado **CRS6-BV**; (iii) o algoritmo CRS baseado em reflexão, proposto no trabalho de Manzanares Filho *et al.* (2005), denominado **CRS-VBR**.

## 5.2 – INFORMAÇÕES GERAIS

Antes de apresentar os resultados dos casos de teste, é conveniente abordar alguns aspectos e registrar o uso de alguns parâmetros, comuns a todos os casos. Aspectos e/ou parâmetros particulares de cada caso serão abordados oportunamente.

- **Geradores de números aleatórios**

Dois geradores de números aleatórios são utilizados no presente trabalho. Um deles utiliza uma distribuição uniforme de probabilidades, e é utilizado na geração da população inicial e nas buscas globais de pontos tentativos. Para esse gerador, a definição da semente e a geração propriamente dita são executadas, respectivamente, através das rotinas SRAND e RAND da biblioteca PORTLIB, que acompanha o compilador Compaq Visual Fortran. O outro gerador de números aleatórios utiliza uma distribuição  $\beta$  de probabilidades e é utilizado apenas no processo de busca local exigido pelo algoritmo CRS6-BV. Para esse gerador, a definição das sementes e a geração propriamente dita são executadas, respectivamente, através das rotinas SETALL e GENBET da biblioteca RANLIB (Brown *et al.*, 1994).

Os resultados obtidos com algoritmos de natureza aleatória, como os CRS, dependem das sementes dos geradores de números aleatórios utilizados. A rigor, ao se aplicar rotinas computacionais baseadas nesses algoritmos, torna-se necessário efetuar repetidos testes com diferentes sementes e analisar estatisticamente os resultados. No presente trabalho, por questões de tempo e facilidade, decidiu-se apresentar resultados de um único teste em cada caso, utilizando as mesmas sementes em todos os casos. Assim, para cada caso e cada versão do CRS, o código computacional é executado uma única vez, sendo a rotina SRAND chamada com a semente igual a 123456 e a rotina SETALL chamada com as sementes iguais a 1. Esses valores são arbitrários, mas foram considerados adequados para os casos a serem apresentados no próximo item.

- **Tamanho da população de aerofólios**

Conforme descrito no item 4.3.2, a população é constituída de 180 aerofólios, sendo de início gerada aleatoriamente.

- **Número de painéis**

O número e a distribuição de painéis no contorno do aerofólio exercem influência significativa na qualidade dos cálculos efetuados pela rotina GRADLIN. É importante que o número de painéis seja suficiente para descrever os detalhes geométricos do perfil alvo (i.e, o perfil que deve melhor atender à distribuição de pressões ou velocidades requerida no projeto inverso). Por outro lado, como a rotina GRADLIN deve ser chamada milhares de vezes durante o processo de busca, é importante utilizar um número de painéis que não seja excessivo, tendo em vista o custo computacional. Nos casos a serem apresentados, resultados satisfatórios foram obtidos com uma distribuição que concentra mais painéis nas regiões dos bordos de ataque e de fuga do perfil. O tamanho dos painéis aumenta em progressão geométrica desde aos bordos até as regiões correspondentes ao máximo arqueamento do perfil. Para os casos apresentados, considerou-se satisfatório utilizar 88 painéis (44 no intradorso e 44 no extradorso) com um fator de progressão igual a 1,10.

- **Intervalos das variáveis de projeto**

As variáveis de projeto correspondem aos intervalos  $\Delta_i$ ,  $i = 1, \dots, 17$ , entre as abscissas e ordenadas da parametrização baseada nas quatro curvas de Bezier (duas para a linha de arqueamento e duas para a linha de espessura), conforme discutido no Capítulo 3. Lembre-se que as 15 coordenadas  $b_i$  dos pontos de controle daquelas curvas são recuperadas recursivamente a partir dos 17 intervalos  $\Delta_i$  (Tabela 3.4). Para a aplicação dos algoritmos CRS, é necessário especificar os limites inferiores e superiores dessas variáveis de projeto,  $\Delta_i^L$  e  $\Delta_i^U$ , respectivamente. A seguir, estão listados os valores desses limites, utilizados em todos os casos de teste:

$$\Delta_1^L = 0,005; \quad \Delta_1^U = 0,400;$$

$$\Delta_2^L = 0,025; \quad \Delta_2^U = 0,500;$$

$$\Delta_3^L = 0,050; \quad \Delta_3^U = 0,700;$$

$$\Delta_4^L = 0,050; \quad \Delta_4^U = 0,700;$$

$$\Delta_5^L = 0,025; \quad \Delta_5^U = 0,600;$$

$$\Delta_6^L = 0,005; \quad \Delta_6^U = 0,500;$$

$$\begin{aligned}
\Delta_7^L &= 0,005; & \Delta_7^U &= 0,400; \\
\Delta_8^L &= 0,005; & \Delta_8^U &= 0,500; \\
\Delta_9^L &= 0,005; & \Delta_9^U &= 0,700; \\
\Delta_{10}^L &= 0,005; & \Delta_{10}^U &= 0,600; \\
\Delta_{11}^L &= 0,005; & \Delta_{11}^U &= 0,500; \\
\Delta_{12}^L &= 0,001; & \Delta_{12}^U &= 0,150; \\
\Delta_{13}^L &= 0,001; & \Delta_{13}^U &= 0,100; \\
\Delta_{14}^L &= 0,001; & \Delta_{14}^U &= 0,250; \\
\Delta_{15}^L &= 0,001; & \Delta_{15}^U &= 0,050; \\
\Delta_{16}^L &= 0,001; & \Delta_{16}^U &= 0,050; \\
\Delta_{17}^L &= 0,001; & \Delta_{17}^U &= 0,050.
\end{aligned}$$

É importante observar que, para a busca dos intervalos  $\Delta_i$  das abscissas ( $i = 1$  até 11), os valores absolutos dos limites não são relevantes, uma vez que aqueles intervalos serão normalizados durante o processo de busca. O que importa nesse caso é a distribuição relativa dos limites. Já os valores individuais dos intervalos das ordenadas ( $i = 12$  até 17) são relevantes, pois estão relacionados aos valores máximos de arqueamento e espessura. Os limites apresentados acima podem ser considerados satisfatórios para o projeto de uma vasta gama de perfis aerodinâmicos com, no máximo, 25% de arqueamento — ( $\Delta_{12}^U + \Delta_{13}^U = 0,25$ ) — e 20% de espessura —  $2(\Delta_{15}^U + \Delta_{16}^U) = 0,20$ .

- **Avaliação da função objetivo e chamada da rotina GRADLIN**

A função objetivo a ser minimizada pelos algoritmos CRS será definida como uma norma (medida) da diferença entre a distribuição de velocidades ou pressões requerida para o perfil alvo e aquela calculada iterativamente durante o processo de minimização. Cada avaliação da função objetivo, portanto, necessita de uma chamada prévia da rotina GRADLIN para cálculo do escoamento na grade em questão. Desse modo, o número de avaliações da função objetivo é igual ao número de chamadas da rotina GRADLIN. Note-se que o número

mínimo de chamadas é 180, que é o tamanho da população, obrigatoriamente avaliada por completo no início do processo de busca.

Para cada caso a ser apresentado, será empregada uma definição diferente da função objetivo, conforme ficará claro mais adiante.

- **Critério de parada**

O número máximo de chamada da função objetivo igual a 20.000 foi fixado como critério de parada em todos os casos estudados. Do ponto de vista de aplicações reais de projeto, é possível obter resultados satisfatórios com um número de chamadas bem inferior a 20.000 (tipicamente, de 1.000 a 5.000). Todavia, para se comparar o comportamento da convergência dos diversos algoritmos CRS, julgou-se conveniente fixar esse número relativamente alto nos testes.

O código computacional admite ainda outro critério de parada, já mencionado no item 4.3.4. Consiste em interromper o processo de busca quando a diferença entre os valores da função objetivo do pior ( $f^H$ ) e do melhor aerofólio ( $f^L$ ) da população corrente ficar abaixo de uma tolerância pré-estabelecida:

$$f^H - f^L < \varepsilon \quad (5.1)$$

Nos casos a serem apresentados, esta tolerância foi fixada em  $10^{-15}$ , valor que jamais pôde ser atingido com um número de chamadas da função objetivo inferior a 20.000. Desse modo, o processo de busca sempre se prolongou o suficiente para se efetuar a comparação entre os algoritmos CRS do ponto de vista de convergência.

## **5.3 – 1º CASO: PERFIL ALVO DESCRITO EXATAMENTE PELA PARAMETRIZAÇÃO**

O objetivo do primeiro caso é testar a capacidade dos algoritmos CRS de recuperar um perfil aerodinâmico cuja geometria é representada com exatidão pela parametrização geométrica descrita no Capítulo 3. Em geral, quando se fornece uma distribuição arbitrária de pressões ou velocidades, o perfil alvo é obviamente desconhecido e a geometria determinada

pelo método inverso provavelmente será aproximada, de modo que a função objetivo raramente tenderá a zero. Além disso, o valor limite obtido para a função objetivo também é desconhecido, sabendo-se apenas que é desejável obter o menor valor possível. Esse tipo de imprecisão decorre das limitações de toda e qualquer parametrização com um número finito e fixo de parâmetros de projeto.

Para efeitos de teste, contudo, sempre é possível gerar um perfil descrito com exatidão pela parametrização adotada e utilizá-lo como alvo. Isso foi feito no presente caso, utilizando diretamente o conjunto de parâmetros  $b_i$ ,  $i = 1, \dots, 15$ , mostrado na Tabela 5.1. O perfil alvo, nesse caso, se assemelha a um perfil NACA 65-1210 (mas não é idêntico).

Tabela 5.1 – Valores ( $b_j$ ) para geração do perfil alvo do 1º Caso

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	$b_{11}$	$B_{12}$	$b_{13}$	$b_{14}$
0,05	0,204	0,3	0,6618	0,5	0,7	0,95	0,204	0,03	0,2	0,05	0,4	0,6	0,9	0,007

Os parâmetros geométricos e cinemáticos de uma grade hipotética também foram arbitrados nesse caso: ângulo de montagem  $\bar{\beta} = 20^\circ$ , razão de solidez  $\ell/t = 1$  e ângulo do escoamento a montante  $\beta_1 = 45^\circ$ . O perfil alvo é discretizado em painéis e a grade é submetida à rotina GRADLIN para cálculo direto do escoamento potencial, usando os mesmos procedimentos empregados no modo inverso. A distribuição de velocidades potencial assim obtida é então fornecida como uma distribuição requerida para o perfil alvo a ser recuperado pelo método inverso.

A função objetivo  $f$  escolhida para o presente caso é apresentada na equação 5.2.

$$f = \left[ \sum_{j=1}^{n_p} (v_{req,j} - v_{c,j})^2 + n_p (\Delta s_{req,j} - \Delta s_{c,j})^2 \Delta s_{req,j} \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

onde  $v_{req,j}$  representa a velocidade requerida no ponto de controle do painel  $j$ ,  $v_{c,j}$  a velocidade correspondente calculada para um certo perfil inicial ou tentativo,  $\Delta s_{req,j}$  o comprimento do painel  $j$  para o perfil alvo,  $\Delta s_{c,j}$  o comprimento do painel  $j$  do perfil tentativo;  $N_p$  representa o número de painéis (88, no caso). Note-se que a inclusão das diferenças dos comprimentos dos painéis em (5.2) auxilia no processo de convergência dos algoritmos, mas não pode ser empregada nos casos gerais em que obviamente o perfil alvo é desconhecido. Note-se também

que, por construção, o mínimo global da função (5.2) é nulo. Logo, tem-se nesse caso uma medida absoluta da qualidade da convergência de cada algoritmo a ser testado.

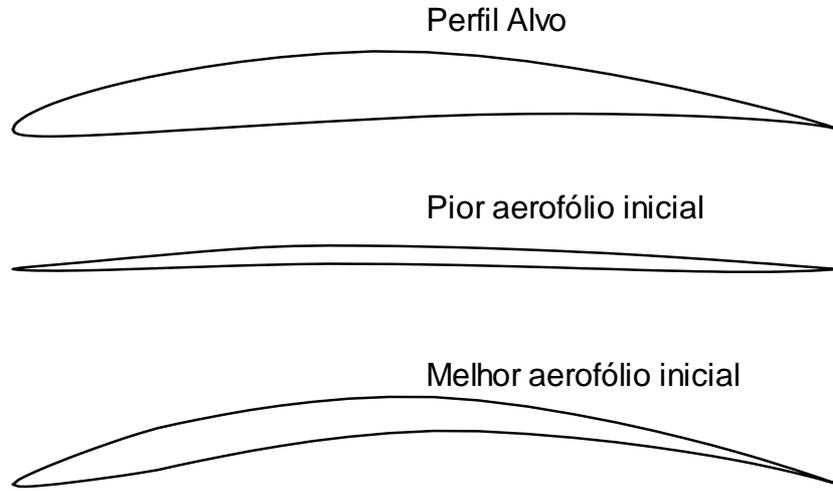


Figura 5.1 – Caso 1: Perfil alvo, pior e melhor aerofólios da população inicial

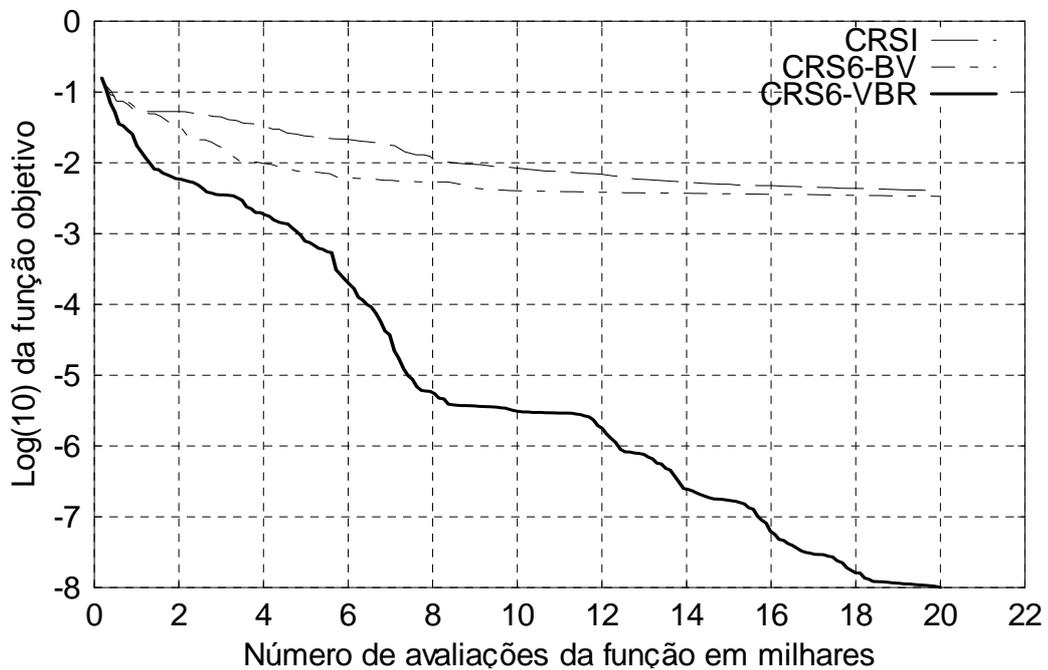


Figura 5.2 – Caso 1: Evolução do processo de convergência dos algoritmos CRS

A Fig. 5.1 mostra os formatos do perfil alvo e do pior (maior função objetivo) e melhor (menor função objetivo) aerofólios da população inicial. Verifica-se que, de início, mesmo o

melhor aerofólio ainda se encontra distante do perfil alvo, o que prenuncia um trabalho intenso a ser realizado pelos algoritmos CRS a fim de se obter um aerofólio minimamente razoável.

A Fig. 5.2 mostra a evolução do processo de convergência dos algoritmos CRS. Após 20.000 avaliações da função objetivo, o algoritmo CRS-VBR atingiu um valor em torno de  $10^{-8}$ , cinco ordens de magnitude abaixo dos valores atingidos pelos outros algoritmos. Esses últimos valores já são atingidos pelo CRS-VBR em menos de 3.500 avaliações.

A Fig 5.3 mostra o formato final dos melhores aerofólios obtidos pelos algoritmos CRS6-BV e CRS-VBR, em comparação com o perfil alvo. A escala das ordenadas foi ampliada sobremaneira de modo a facilitar a visualização. Observa-se que os formatos são praticamente indistinguíveis nessa figura. Isso indica que, nesse caso, apesar do algoritmo CRS-VBR ter se mostrado nitidamente superior, a convergência dos demais algoritmos é satisfatória do ponto de vista aplicado. Todavia, convém salientar que os resultados desses algoritmos podem ser obtidos pelo CRS-VBR com muito menos avaliações da função objetivo.

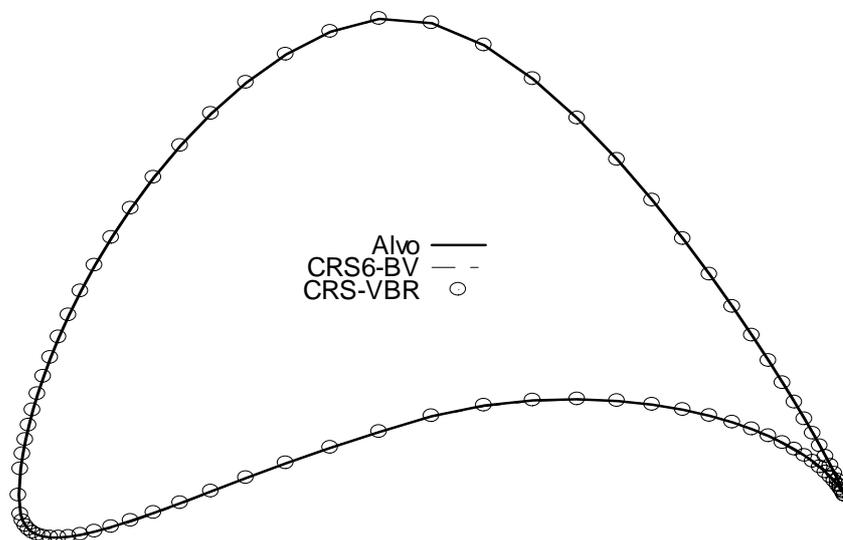


Figura 5.3 – Caso 1: Comparação entre aerofólios resultantes e o perfil alvo

A Fig. 5.4 mostra a distribuição de pressões final dos melhores aerofólios obtidos pelos algoritmos CRS6-BV e CRS-VBR, em comparação com aquela do perfil alvo (correspondente à distribuição de velocidades requerida). Verifica-se que o mesmo que foi

dito em relação aos formatos da Fig. 5.3 se aplica às distribuições de pressões correspondentes.

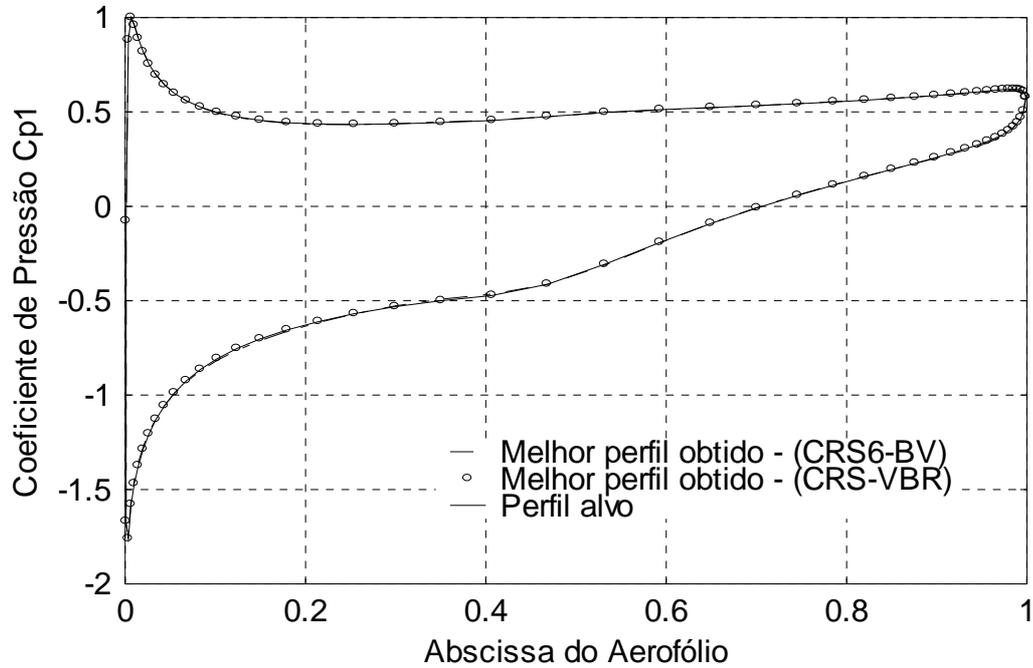


Figura 5.4 – Caso 1: Distribuições de pressões para aerofólios resultantes e perfil alvo

Tabela 5.2 – Caso 1: Comparação das normas geométricas dos melhores aerofólios finais

Tipo de Busca	Norma Geométrica
CRS-VBR	$1,7526 \times 10^{-8}$
CRS6-BV	$5,9688 \times 10^{-3}$
CRSI	$2,6763 \times 10^{-2}$

A Tabela 5.2 mostra os resultados obtidos para as normas geométricas com os melhores aerofólios após 20.000 avaliações da função objetivo. A norma geométrica foi definida como a norma L2 da distância entre o perfil calculado e o perfil alvo (calculada com base nos pontos extremos dos painéis). Note-se que essa norma não pode ser calculada nos casos gerais, em que o perfil alvo é desconhecido. Observa-se um excelente resultado na recuperação do perfil com o algoritmo CRS-VBR, amplamente superior aos dos demais algoritmos.

## 5.4 – 2º CASO: EXEMPLO DA LITERATURA

No segundo caso, busca-se reproduzir uma situação de projeto inverso de grades lineares tratada na literatura através de outro algoritmo de otimização conhecido como Evolução Diferencial (Rogalsky *et al.*, 1999). O objetivo dos autores é obter não só o formato do perfil mas também o espaçamento de grade e o ângulo de montagem que melhor se adaptem a uma distribuição de pressões requerida. Essa distribuição é estipulada com base no procedimento de Liebeck (1973) para obtenção de perfis isolados de alta sustentação. Rogalsky *et al.* (1999) utilizam um método de painéis semelhante ao implementado na rotina GRADLIN e a parametrização de Venkataraman (1995). Na realidade, o trabalho de Rogalsky *et al.* (1999) serviu de referência básica para o desenvolvimento desta dissertação e julgou-se conveniente avaliar a capacidade dos algoritmos CRS em reproduzir o caso tratado por aqueles autores. Além disso, os perfis obtidos pelas distribuições de Liebeck (1973) são bem diferentes daqueles usualmente utilizados em ventiladores (série NACA 65, p.ex.) e seria conveniente explorar essa diversidade.

Dados da distribuição de pressões requerida foram obtidos diretamente dos gráficos de Rogalsky *et al.* (1997) através de um *software* de digitalização. Foram colhidos 63 pontos da distribuição. Como o número de painéis utilizado é 88, foi aplicada uma rotina de interpolação *spline* cúbica àqueles pontos, tornando possível o cálculo dos valores requeridos do coeficiente de pressão nos pontos de controle dos painéis de cada ponto tentativo, durante o processo de busca. Isso é necessário para se calcular a função objetivo que, nesse caso, é definida do mesmo modo que Rogalsky *et al.* (1999), Eq. (5.3):

$$f = \left[ \sum_{j=1}^{n_p} (C_{p1req,j} - C_{p1c,j})^2 \right]^{1/2} \quad (5.3)$$

onde  $C_{p1req,j}$  e  $C_{p1c,j}$  representam, respectivamente, os coeficientes de pressão requerido e calculado no ponto de controle  $j$ .

No presente trabalho, os parâmetros geométricos da grade otimizada por Rogalsky *et al.* (1999) foram fixados: ângulo de montagem  $\bar{\beta} = 4,74^\circ$ , razão de solidez  $\ell/t = 0,8453$ ; o ângulo do escoamento na entrada é  $\beta_1 = 30^\circ$ . Desse modo, apenas os parâmetros geométricos do perfil são tratados como variáveis de projeto.

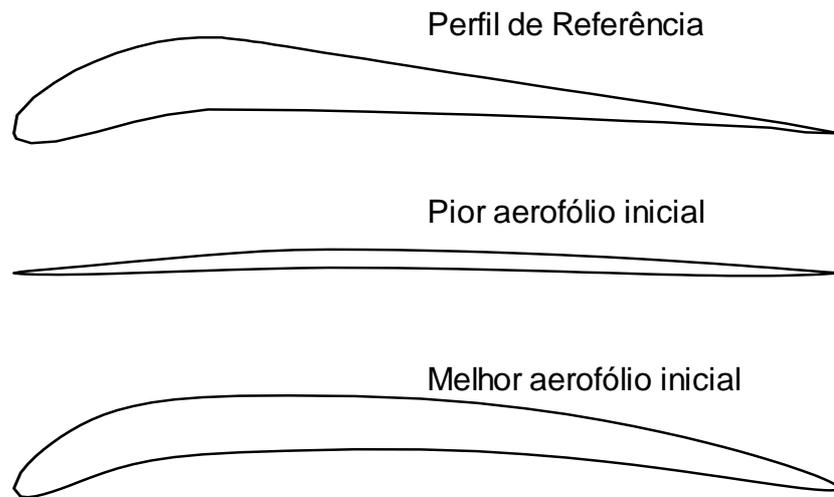


Figura 5.5 – Caso 2: Perfil de referência, pior e melhor aerofólios da população inicial

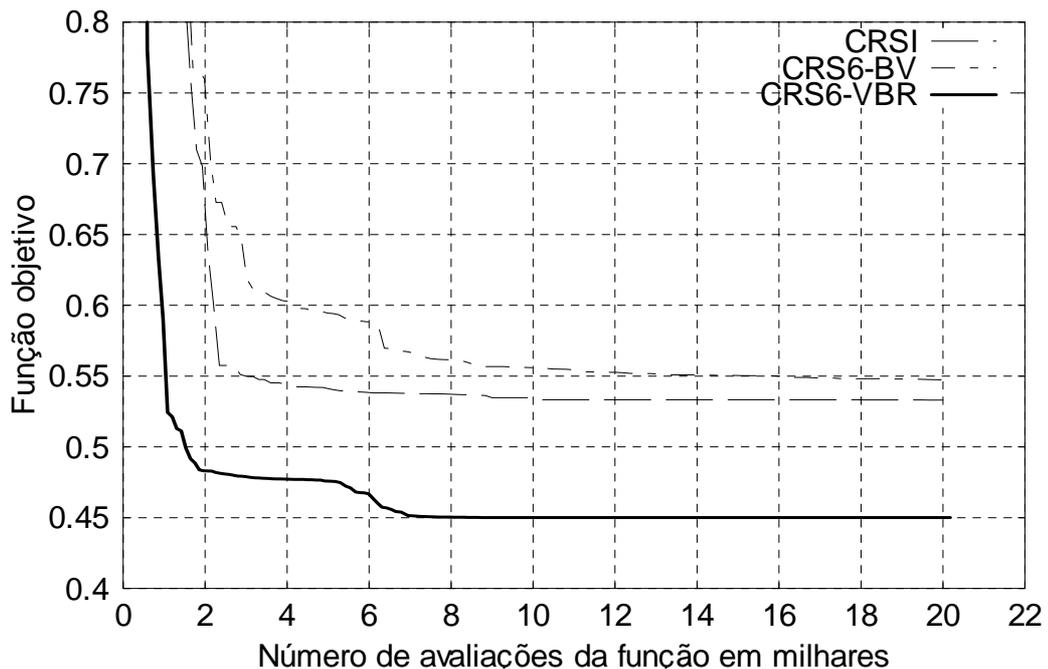


Figura 5.6 – Caso 2: Evolução do processo de convergência dos algoritmos CRS

A Fig. 5.5 mostra os formatos do perfil de referência e do pior (maior função objetivo) e melhor (menor função objetivo) aerofólios da população inicial. É importante destacar que o perfil de referência não é o perfil alvo nesse caso, mas apenas um esboço do perfil obtido por Rogalsky *et al.* (1999), traçado com pontos colhidos pelo *software* de digitalização. Note-se

que o perfil de referência se assemelha realmente aos perfis de Liebeck (1973), pouco usuais em projetos de ventiladores e compressores. Note-se também que o melhor aerofólio inicial se aproxima do perfil de referência mais em termos de arqueamento do que de espessura. Convém mencionar ainda que os aerofólios da população inicial são os mesmos em todos os casos apresentados neste trabalho. Entretanto, a definição do melhor e do pior aerofólio de cada caso depende da distribuição de pressões requerida e do cálculo da função objetivo.

A Fig. 5.6 mostra a evolução do processo de convergência dos algoritmos CRS. Nesse caso, novamente, o algoritmo CRS-VBR demonstrou superioridade sobre os demais algoritmos. Após 20.000 avaliações, os valores da função objetivo atingidos pelos algoritmos CRS6-BV, CRSI e CRS-VBR foram, respectivamente, 0,5470, 0,5358 e 0,4501. De fato, uma convergência com três algarismos significativos já é atingida após 10.000 avaliações pelos CRS6-BV e CRSI e após 8.000 pelo CRS-VBR. Esse último já atinge valores satisfatórios com menos de 2.000 avaliações. Note-se que, neste caso, o algoritmo CRSI foi ligeiramente superior ao CRS6-BV, o que mostra que o uso de buscas locais nem sempre é benéfico.

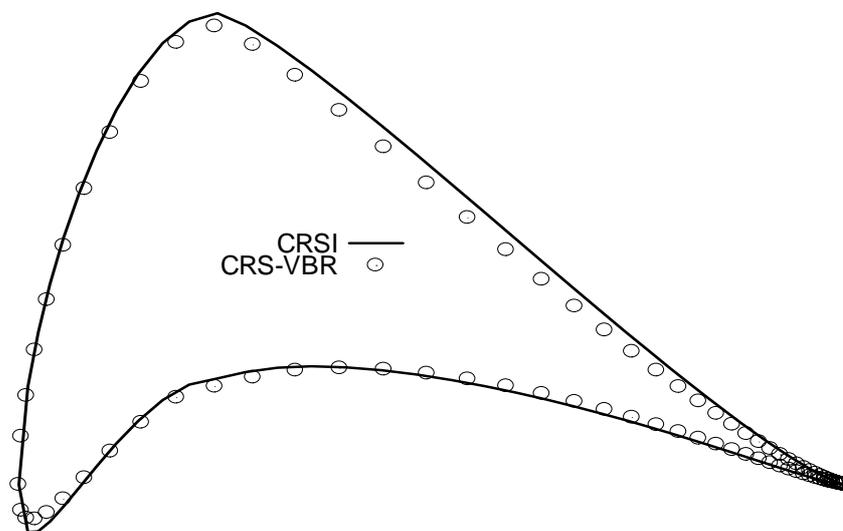


Figura 5.7 – Caso 2: Comparação entre aerofólios resultantes

A Fig 5.7 mostra o formato final dos melhores aerofólios obtidos pelos algoritmos CRSI e CRS-VBR.. O esboço do perfil de referência foi omitido a fim de manter o foco na comparação entre os algoritmos. Nesse caso, é sensível a diferença na geometria dos aerofólios resultantes, o que mostra que o algoritmo de busca pode ter um papel importante nas metodologias de projeto inverso. Naturalmente, os resultados do CRS-VBR são superiores

e deveriam ser eleitos no caso de uma aplicação real de projeto. Essa conclusão pode ser confirmada pela Fig. 5.8, onde se mostra que a distribuição de pressões do melhor aerofólio obtido pelo CRS-VBR é nitidamente mais próxima da distribuição requerida para o perfil alvo do que aquela correspondente ao CRSI.

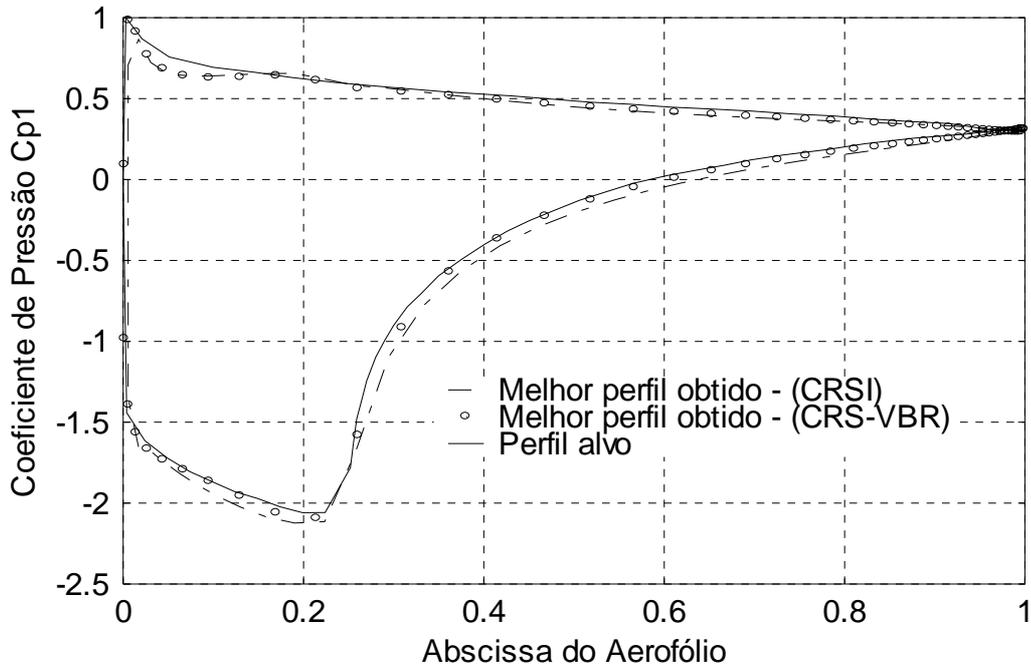


Figura 5.8 – Caso 2: Distribuições de pressões para aerofólios resultantes e perfil alvo

Rogalsky *et al.* (1999) não apresentam a evolução da convergência de seus resultados, mas reportam um valor de 0,62 para a função objetivo ao final do processo. Esse valor é pior que os obtidos por todos os algoritmos CRS neste trabalho. Contudo, essa comparação deve ser vista com ressalvas, pois existem diferenças metodológicas e de discretização entre os trabalhos. Quanto ao número de avaliações da função objetivo, Rogalsky *et al.* (1999) indicam apenas que o algoritmo de evolução diferencial requer, em geral, de 50.000 a 100.000 avaliações para obter uma população de aerofólios com  $\varepsilon = f^h - f^l < 10^{-5}$ . No presente caso, após 20.000 avaliações da função objetivo, o algoritmo CRS-VBR obteve uma população de aerofólios com  $\varepsilon = f^h - f^l = 2,48 \times 10^{-6}$ .

## 5.5 – 3º CASO: DADOS EXPERIMENTAIS PARA A DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES DO PERFIL ALVO

No terceiro caso, testa-se a capacidade dos algoritmos CRS de recuperar um perfil de uma grade real, partindo de dados experimentais da distribuição de pressões no contorno. É feita também uma comparação entre os perfis obtidos através de cálculos com escoamento puramente potencial e com o ajuste de Gostelow (conforme descrito no Capítulo 2).

A grade em questão é constituída de perfis NACA 65-1510, com ângulo de montagem  $\bar{\beta} = 43,5^\circ$ , razão de solidez  $\ell/t = 1$  e ângulo do escoamento na entrada  $\beta_1 = 60^\circ$  (ângulo de ataque  $\alpha_1 = \beta_1 - \bar{\beta} = 16,5^\circ$ ). Dados experimentais para essa grade foram obtidos por Emery *et al.* (1958) — pág. 40, Fig. 57(e). Foram colhidos 30 pontos experimentais dessa figura usando um *software* de digitalização. Assim como no 2º caso, foi aplicada uma interpolação *spline* cúbica a esses pontos a fim de se calcular a função objetivo com valores do coeficiente de pressão nos pontos de controle dos painéis.

Neste 3º caso, utiliza-se uma função objetivo semelhante à do 2º caso (Eq. 5.3), efetuando-se, porém, ponderações locais com os comprimentos dos painéis calculados para o perfil tentativo,  $\Delta s_{c,j}, j = 1, \dots, N_p$ :

$$f = \left[ \sum_{j=1}^{N_p} \left( C_{p1_{req,j}} - C_{p1_{c,j}} \right)^2 \Delta s_{c,j} \right]^{1/2} \quad (5.4)$$

As ponderações locais produziram melhoras significativas no processo de convergência, mostrando que a definição da função objetivo é muito importante. Em geral, a definição dada em (5.4) é recomendável em todos os casos.

Observação: antes de se iniciar o processo de busca, especifica-se qual o conjunto de valores calculados dos coeficientes de pressão  $C_{p1_{c,j}}$  devem ser usados na Eq. (5.4) durante todo o processo: (a) escoamento puramente potencial ou (b) escoamento com o ajuste de Gostelow para efeitos viscosos. As duas opções foram testadas neste caso.

A Fig. 5.9 mostra os formatos do perfil NACA 65-1510 e do pior (maior função objetivo) e melhor (menor função objetivo) aerofólios da população inicial. Observa-se que o melhor perfil na situação puramente potencial é diferente daquele na situação com o ajuste de Gostelow: este último já tende a ser mais arqueado que o primeiro de modo a compensar a

influência dos efeitos viscosos sobre a deflexão do escoamento através da grade. Curiosamente, o pior perfil da população é o mesmo em ambas as situações.

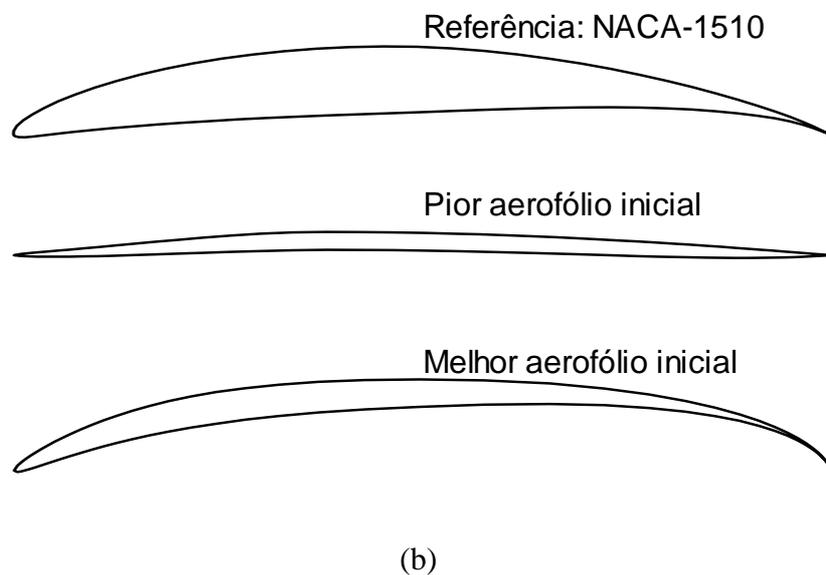
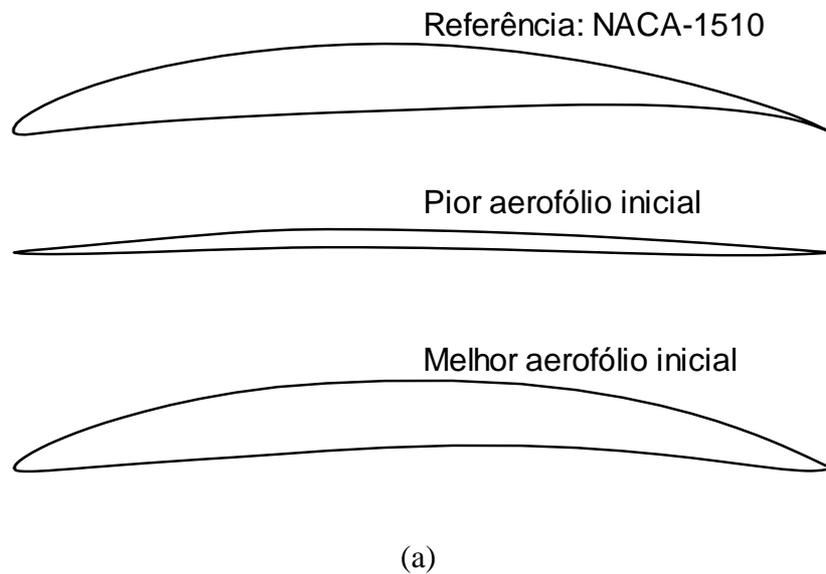
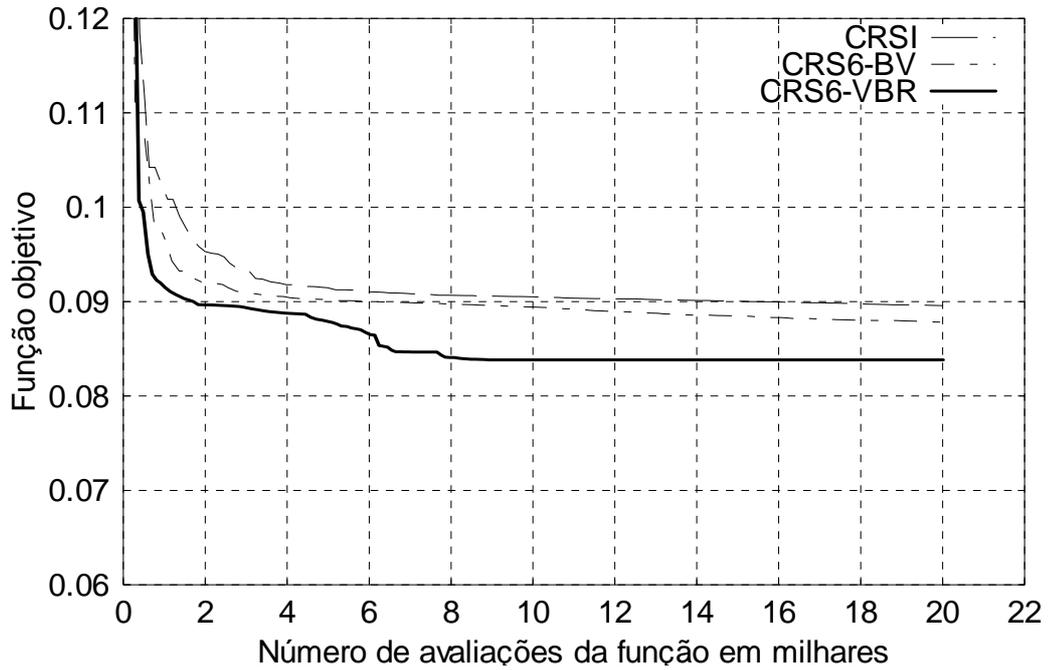
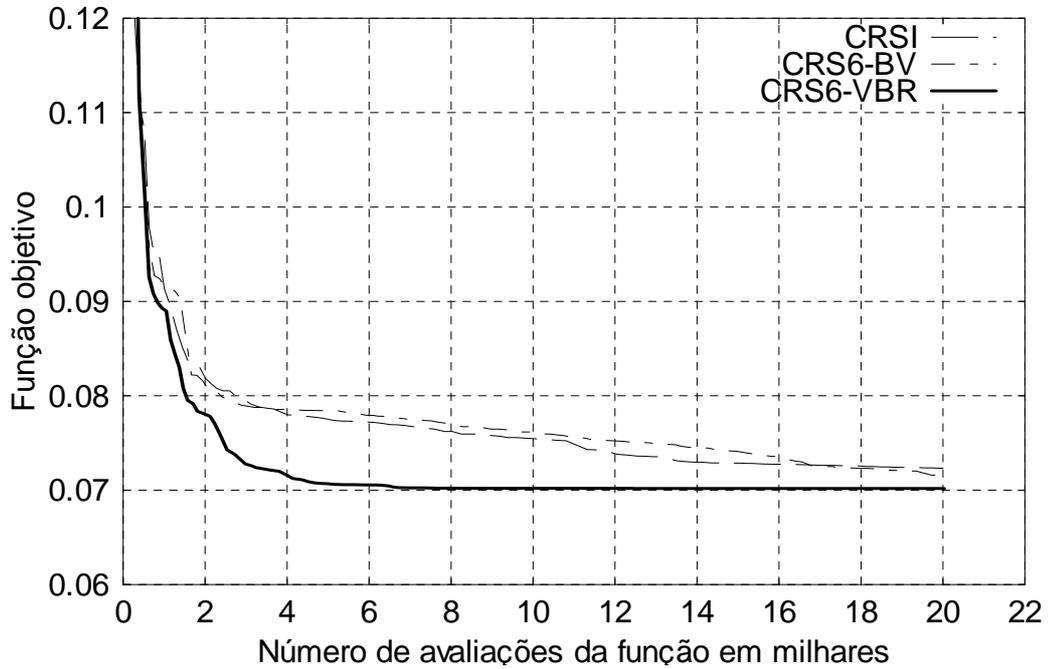


Figura 5.9 – Caso 3: Perfil NACA-1510, pior e melhor aerofólios da população inicial:  
(a) escoamento puramente potencial; (b) escoamento com o ajuste de Gostelow



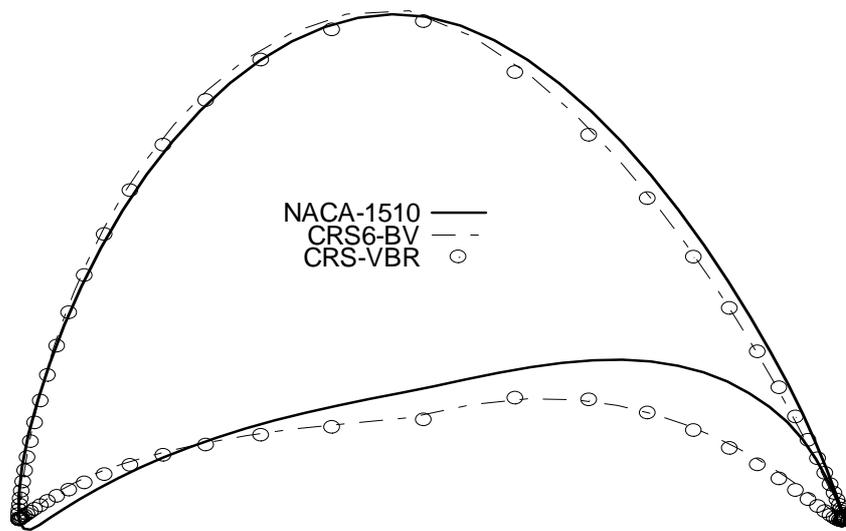
(a)



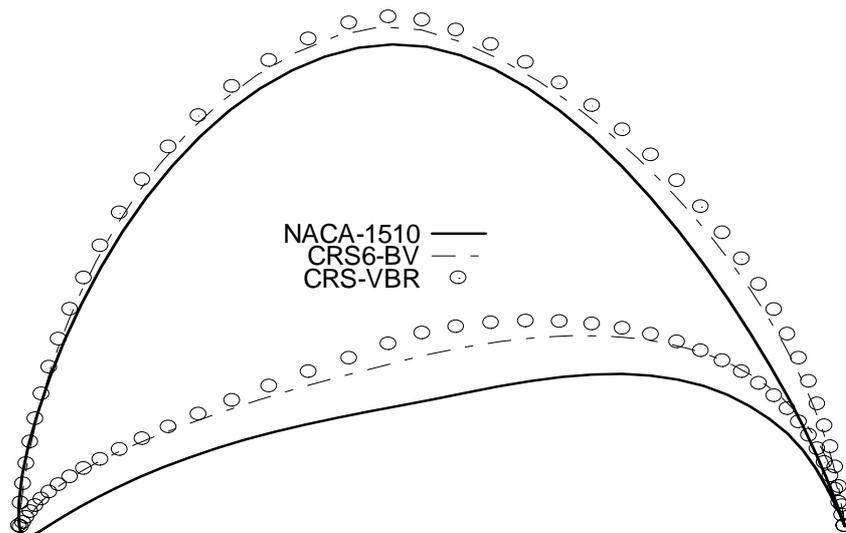
(b)

Figura 5.10 – Caso 3: Evolução do processo de convergência dos algoritmos CRS  
 (a) escoamento puramente potencial; (b) escoamento com o ajuste de Gostelow

A Fig. 5.10 mostra a evolução do processo de convergência dos algoritmos CRS. Novamente, o algoritmo CRS-VBR demonstra superioridade sobre os demais. Para todos os algoritmos, o ajuste de Gostelow permitiu obter uma redução nos valores finais da função objetivo em relação à situação puramente potencial. Os valores finais para os algoritmos CRSI, CRS6-BV e CRS6-VBR são, respectivamente: (a) 0,089582, 0,087818, 0,083827, para escoamento puramente potencial; (b) 0,072339, 0,071487, 0,070184, para escoamento com o ajuste de Gostelow.



(a)



(b)

Figura 5.11 – Caso 3: Comparação entre aerofólios resultantes e o perfil NACA-1510

(a) escoamento puramente potencial; (b) escoamento com o ajuste de Gostelow

A Fig 5.11 mostra o formato final dos melhores aerofólios obtidos pelos algoritmos CRS6-BV e CRS-VBR, em comparação com o perfil NACA 65-1510. Note-se que o escoamento com o ajuste de Gostelow produz aerofólios mais arqueados que o escoamento potencial, confirmando a tendência anunciada já na população inicial. O escoamento potencial subestima o arqueamento em relação ao perfil NACA 65-1510. Por outro lado, a introdução do ajuste de Gostelow acaba por superestimar o arqueamento, o que parece indicar que os efeitos viscosos também estariam sendo superestimados pelo ajuste, neste caso. Essa observação não corresponde a uma tendência geral, pois o ajuste de Gostelow pode tanto superestimar como subestimar os efeitos viscosos, dependendo do caso. O importante aqui é mostrar que os efeitos viscosos são de extrema importância para os métodos inversos e que a presente metodologia parece capaz de tratá-los satisfatoriamente, desde que se utilize um método de cálculo de escoamento suficientemente representativo daqueles efeitos.

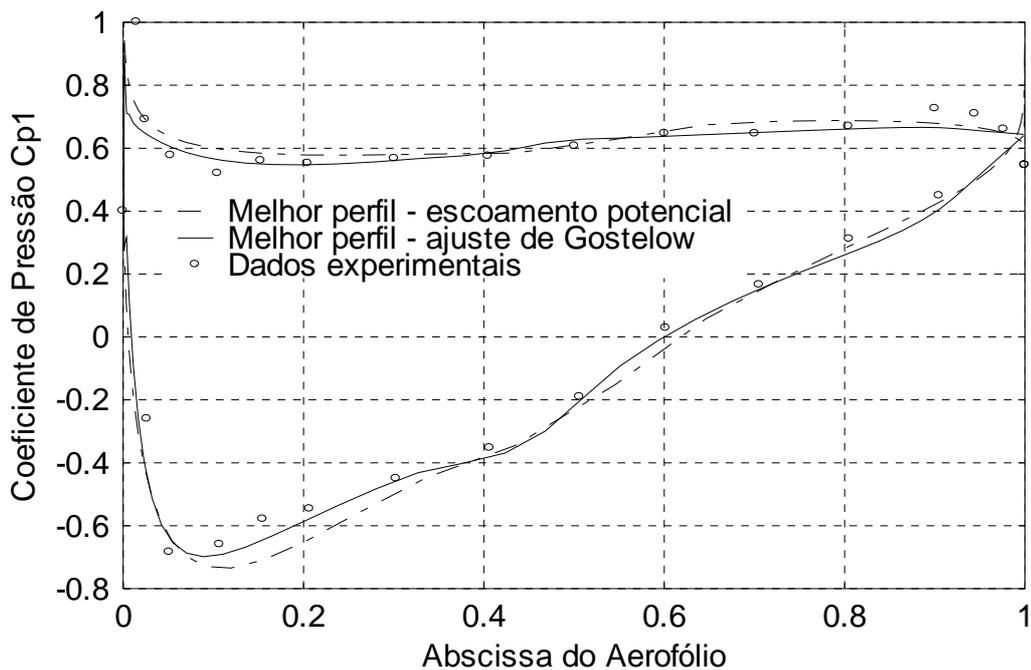


Figura 5.12 – Caso 3: Distribuições de pressões para aerofólios resultantes e experimental

A Fig. 5.12 mostra a distribuição de pressões final dos melhores aerofólios obtidos pelo algoritmo CRS-VBR, em comparação a distribuição experimental. Observa-se que o ajuste de Gostelow realmente produz uma distribuição de pressões mais próxima dos dados experimentais que o escoamento puramente potencial, confirmando as expectativas.