

OTIMIZAÇÃO DE PROJETO DE AVIÃO PARA A COMPETIÇÃO AERODESIGN UTILIZANDO RECOZIMENTO SIMULADO

DIEGO MOVIO BORBUREMA*, MARCOS DE SALES GUERRA TSUZUKI*,
ANTONIO LUIS DE CAMPOS MARIANI†, EDSON KENJI UEDA*,
EMILIANO GONÇALVES DE CASTRO*, THIAGO DE CASTRO MARTINS*

**Laboratório de Geometria Computacional,
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos,
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Avenida Prof. Melo Moraes, 2231, CEP 05508-030 - São Paulo, SP, Brasil.*

†Departamento de Engenharia Mecânica - EPUSP

Emails: diego.movio@gmail.com, mtsuzuki@usp.br, camposmariani@gmail.com,
ueda.edson@gmail.com, emiliano@usp.br, thiago@usp.br

Abstract— The SAE AeroDesign competition have the objective of rewarding the best designed and well performed aircraft, which is reached, essentially, with the highest ratio between the lifted weight and its own weight. This competition has grown in the last few years just like its teams competitiveness, they are getting very close of reaching the perfect aircraft configuration. The aircraft must satisfy some constraints, what defines an optimization problem with constraints. In this article, it is proposed a scheme representation efficient that has a representation domain with a great majority of models satisfying several of the constraints. The simulated annealing was used to determine the optimum aircraft design. The simulated annealing uses the crystallization heuristic that allow the existence of parameters with different sensibilities. The results demonstrate the proposed algorithm finds models with high grades. The model with highest grade was built in scale and tested in a wind tunnel.

Keywords— Parametric representation scheme, simulated annealing, constraint optimization.

Resumo— A competição SAE de AeroDesign tem como objetivo premiar a aeronave com o melhor projeto e desempenho, que é alcançado, essencialmente, pelo maior valor alcançado pela razão entre a carga levantada pela aeronave e seu próprio peso. Essa competição cresceu muito nos últimos anos aumentando a competitividade das equipes, que chegam cada vez mais perto da configuração da aeronave perfeita. A aeronave deve satisfazer um conjunto de restrições, definindo um problema de otimização com restrições. Neste artigo é proposto um esquema de representação eficiente que possui um domínio de representação com modelos válidos satisfazendo diversas restrições, e utilizou-se o recozimento simulado para encontrar o projeto ótimo. O recozimento simulado utilizado faz uso da heurística de cristalização que permite que existam parâmetros com diferentes sensibilidade. Os resultados demonstram que o algoritmo determina modelos com elevada pontuação. O modelo com a pontuação mais elevada foi construído em escala e testado em túnel de vento.

Palavras-chave— Esquemas de representação paramétrica, recozimento simulado, otimização com restrições.

1 Introdução

A SAE (Society of Automotive Engineers) Brasil organiza anualmente uma competição de AeroDesign na qual estudantes de engenharia são desafiados a organizar, planejar e construir um avião rádio controlado que carregue a maior quantidade de carga possível, evidenciando os desafios reais da indústria aeronáutica¹.

O objetivo da equipe participante na competição é construir uma aeronave estável que atinja a maior pontuação possível dentro das restrições impostas pelo regulamento. Dentre essas restrições pode-se citar geometria (soma dimensional limitada), recursos (material da carga, motores e combustíveis específicos), além de comprimentos limitados de pista para decolagem e pouso.

A pontuação da competição é calculada por vários fatores como confiabilidade (uma curva de

acuracidade confiável, que mostra a carga máxima carregada pelo avião dadas as condições de temperatura e pressão do ambiente), carga paga (peso próprio do avião mais peso carregado), eficiência estrutural (razão entre carga paga e peso próprio). Portanto há um estímulo por meio da competição para que as equipes construam uma aeronave leve e resistente com alta eficiência estrutural. Para que ela seja alcançada, é necessário um ótimo projeto conceitual e preliminar que almeje o melhor avião possível segundo as restrições estabelecidas.

2 Esquemas de Representação

A Fig. 1 representa um esquema de representação onde modelos paramétricos (à esquerda) são mapeados para projetos de aeronaves (à direita). O conjunto escuro à esquerda representa modelos paramétricos inválidos que, segundo o esquema de representação, não são associados à nenhum projeto de aeronave. O conjunto escuro à direita exibe projetos de aeronave que não podem ser re-

¹http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/aero_2013_Regulamento_SAE_Brasil_AeroDesign_2013_Rev00.pdf

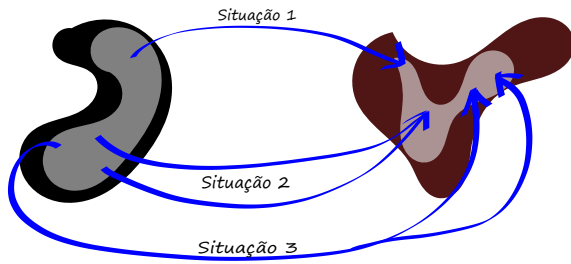


Figura 1: Esquema de representação exibindo alguns mapeamentos. O espaço paramétrico está à esquerda e os projetos de aeronave estão à direita.

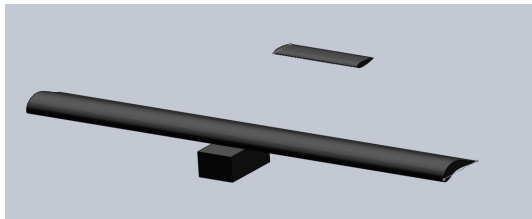


Figura 2: Projeto genérico convencional de aeronave. Estão exibidas a asa, a fuselagem e a cauda.

presentados por modelos paramétricos segundo o esquema de representação adotado.

O esquema de representação ideal é aquele cujos conjuntos escuros são os menores possíveis, assim todos os modelos paramétricos são válidos e todos os projetos de aeronave são representados parametricamente.

A situação 1 representa o mapeamento de um modelo paramétrico para um projeto de aeronave. A situação 2 também representa um mapeamento válido em que um único projeto de aeronave é representado por dois modelos paramétricos. A situação 3 representa um mapeamento inválido em que um único modelo paramétrico representa dois projetos de aeronave. Nesta última situação, existe ambiguidade de representação, pois não se consegue distinguir os dois projetos de aeronave segundo o esquema de representação adotado.

3 Avaliação do Projeto da Aeronave

Modelos paramétricos representam projetos de aeronaves que serão avaliados para determinar a validade do projeto e a sua pontuação. A Fig. 2 exibe um projeto genérico convencional de aeronave. A validade do projeto da aeronave é definida pelas restrições do regulamento do AeroDesign e a sua pontuação é definida pela função objetivo, também definida pelo regulamento do AeroDesign. A Fig. 3 exibe um fluxograma da avaliação da validade e da pontuação do projeto da aeronave.

Cada uma das restrições é verificada em

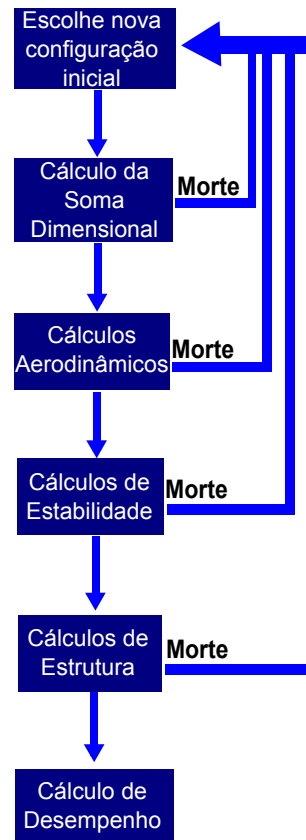


Figura 3: Fluxograma para avaliação da validade e da pontuação do projeto da aeronave.

sequência, e caso uma restrição não seja satisfeita, o projeto da aeronave é considerado inválido. Para modelos de aeronave inválidos a sua pontuação é considerada nula. Caso todas as restrições sejam satisfeitas, a pontuação da aeronave é determinada.

As restrições avaliadas são: soma dimensional, aerodinâmica, estabilidade e estrutural. A restrição de soma dimensional determina que a soma do comprimento, largura e altura do projeto da aeronave deve ser inferior a um limite. O processo de verificação aerodinâmica determina alguns coeficientes derivados do projeto da aeronave que analisam a geometria da asa. Caso a geometria da asa não atenda aos padrões estabelecidos, o projeto da aeronave é considerado inválido.

O processo de verificação de estabilidade determina alguns coeficientes a partir do projeto da aeronave. Estes coeficientes definem se a aeronave, considerando que exista uma força que perturbe o equilíbrio, volta a sua posição estável de equilíbrio. Estes coeficientes necessitam estar dentro de intervalos aceitáveis, em caso contrário o projeto da aeronave é considerado inválido. Adicionalmente, se o ângulo de trimagem for maior que o de estol, o projeto da aeronave é considerado inválido.

O processo de verificação estrutural avalia o

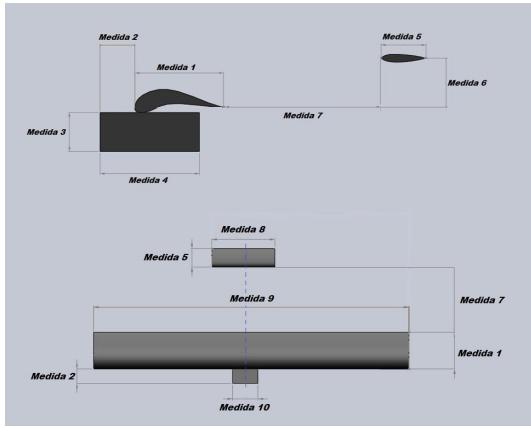


Figura 4: Vistas superior e lateral do projeto da aeronave segundo um esquema de representação paramétrico.

peso aproximado da aeronave segundo a densidade do material utilizado e pelo volume esperado da longarina. O motor do avião é posicionado de modo a equilibrar o centro gravitacional da aeronave. Se o motor não estiver a pelo menos 8 cm da fuselagem, o projeto da aeronave é considerado inválido.

Finalmente, após satisfazer todas as restrições, a rotina de desempenho determina a carga que pode ser levantada pela aeronave segundo o comprimento de pista definido pela competição, e a pontuação do projeto da aeronave é calculada.

3.1 Definição do Esquema de Representação

Nesta seção será mostrado que o esquema de representação influi diretamente na determinação do projeto ótimo. A Fig. 4 exibe um esquema de dimensionamento do projeto de aeronave que também é um esquema de representação. Este esquema de representação foi utilizado em conjunto com a meta-heurística Algoritmo Genético (Thengade and Dondal, 2012) para determinar o projeto de aeronave ótimo.

Após diversas análises, determinou-se que o conjunto inválido do espaço paramétrico para este esquema de representação apresentou-se demasiadamente grande. Este fato torna a exploração do espaço paramétrico demasiadamente penosa pelo número exagerado de modelos paramétricos inválidos.

Os modelos paramétricos dificilmente satisfaziam a restrição de soma dimensional, que é o resultado da soma de 7 dimensões: medidas 1, 2, 3, 5, 6, 7 e 9 (vide Fig. 4).

4 Esquema de Representação Proposto

Foram estudados novos esquemas de representação paramétrica para o modelo do aeroplano. Após diversos ensaios, considerou-se criar um es-

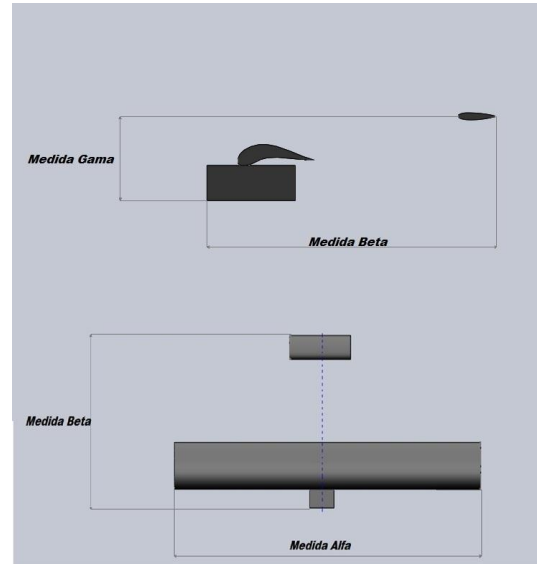


Figura 5: Esquema de representação paramétrica proposto, segundo as vistas superior e lateral.

quema de representação baseado em três medidas principais: α , β e γ (vide Fig. 5).

Portanto, os chutes geométricos são segmentados em:

1. Medida α = medida 9;
2. Medida β = medida 1 + medida 2 + medida 5 + medida 7 (A posição da fuselagem em relação ao perfil é constante);
3. Medida γ = medida 3 + medida 6.

Assim, estas três medidas são determinadas primeiro de modo a sempre satisfazerem a restrição de soma dimensional. A medida 9 recebe o valor já determinado da α , depois a medida 1 é determinada dentro de um intervalo específico, sendo determinadas em seguida as medidas 7 e 5. A medida 2 terá sua dimensão determinada pela diferença entre a somatória das medidas já calculadas e β . Da mesma forma, γ é utilizado para determinar as medidas 6 e 3.

As medidas 4 e 10 serão dimensionadas depois dessa iteração para que o volume da fuselagem atenda ao volume da carga levantada. A medida 8 possui certa flexibilidade, o que permite uma maior varredura do espaço amostral de aeroplanos.

5 Recozimento Simulado

O recozimento simulado (Kirkpatrick et al., 1983) é uma meta-heurística probabilística de exploração local. Este tipo de heurística de otimização analisa a cada iteração uma e somente uma solução do problema. O custo desta solução é comparado com o custo da solução da iteração imediatamente anterior, e baseando-se em regras da

heurística, uma nova solução é gerada para a próxima iteração.

A solução candidata x_i^* avaliada na iteração $i+1$ é escolhida aleatoriamente em uma vizinhança da solução atual x_i . A solução atual x_i pode ser substituída em uma determinada iteração pela solução candidata x_i^* de acordo com as seguintes regras:

- $f(x_i^*) \leq f(x_i)$: neste caso, a solução atual é imediatamente substituída pela solução analisada.
- $f(x_i^*) > f(x_i)$: a solução atual pode ser substituída pela solução analisada com probabilidade determinada pela diferença de custos e pela “temperatura” do processo.

A “temperatura” é um parâmetro do recozimento simulado que varia ao longo do processo de acordo com um “programa de resfriamento”. Genericamente, quanto maior for a temperatura, maior a probabilidade do recozimento simulado substituir uma solução de custo inferior por uma solução de custo superior (caminhando assim, na direção do gradiente ascendente de custos). É este o tipo de movimentação que permite ao processo escapar de mínimos locais. À medida que o processo avança, a temperatura é gradativamente reduzida, permitindo assim que este se fixe em uma solução ótima.

A proposta inicial feita por Kirkpatrick et al. (1983) era aplicada a problemas combinatórios. Corana et al. (1987) adaptaram o recozimento simulado para que problemas com parâmetros contínuos fossem solucionados. Nesta adaptação foi introduzido o conceito de distância Euclidiana entre possíveis soluções, uma vez que as soluções estão no espaço real multidimensional. Kirkpatrick et al. (1983) já havia observado que o recozimento simulado apresenta duas fases: exploratória e refinamento. Durante a fase exploratória, segundo a proposta feita por Corana et al. (1987), o recozimento simulado permite que a adjacência explorada seja maior; e durante a fase de refinamento, permite que a adjacência explorada seja menor. A adjacência varia mantendo a quantidade de soluções aceitas pelo recozimento simulado em um nível razoável, pois soluções candidatas rejeitadas não favorecem a evolução.

Ingber (1989) apresentou o ASA (“Adaptive Simulated Annealing”), onde o desvio padrão da densidade de probabilidades das possíveis soluções reduz com a temperatura segundo a distribuição de Cauchy. Assim, o máximo valor possível não diminui com a temperatura, mas a probabilidade de selecionar soluções candidatas distantes da solução atual diminui com a temperatura. Martins and Tsuzuki (2010) propuseram um recozimento simulado que automaticamente determina para cada parâmetro o desvio padrão mais adequado para a sua distribuição de probabilidades

na definição do próximo candidato. Assim, cada parâmetro pode possuir a sua própria distribuição de probabilidades, independentemente da temperatura. O principal conceito envolvido é modificar um parâmetro por vez, e identificar se a modificação ao parâmetro específico contribui ou não para que a solução candidata seja aceita. Caso a solução candidata seja aceita, significa que o desvio padrão está relativamente pequeno para este parâmetro e que ele pode ser aumentado. Em caso contrário, onde a solução candidata foi rejeitada, o desvio padrão deste parâmetro específico deve ser reduzido. A distribuição de probabilidade de seleção de uma solução nova na vizinhança da atual não é uniforme, mas depende do fator de cristalização c_k do parâmetro a ser alterado. O fator de cristalização é uma variável associada a cada parâmetro que regula a amplitude dos seus movimentos. Seu objetivo é reduzir a amplitude de movimento de um parâmetro cuja movimentação historicamente leva a soluções rejeitadas (Martins and Tsuzuki, 2009).

A vantagem do recozimento (Kirkpatrick et al., 1983) é não necessitar de derivadas da função objetivo. O recozimento simulado utilizado nesta pesquisa está exibido na Fig. 6.

```

x ← <solução inicial aleatória>
T0 ← <temperatura inicial>
enquanto <Não terminado> faça
  enquanto <condição global não
  satisfeita> faça
    Ti ← Ti * α; i ← i + 1
    enquanto <condição local não
    satisfeita> faça
      k ← <seleciona o parâmetro a
      ser modificado>
      xk* ← xk +  $\frac{1}{c_i} \sum_1^{c_i} r(-1, 1) \cdot \Delta r$ ;
      ΔE = F(x*) - F(x)
      se ΔE < 0 então
        x ← x*
        ci ← ci - 1;
      senão
        se r(0, 1) < e-ΔE/kT então
          x ← x*
          ci ← ci - 1;
        senão
          ci ← ci + 1;

```

Figura 6: O recozimento simulado.

6 Resultados e Discussões

Antes desta implementação, eram necessários cerca de 25 horas para encontrar uma população que daria início ao GA (Genetic Algorithm). Com a proposta atual, o recozimento simulado é iniciado imediatamente. As Figs. 7, 8 e 9 exibem gráfi-

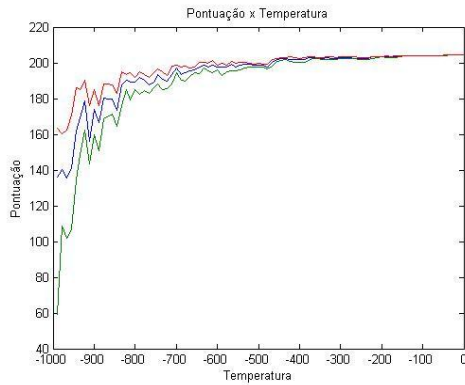


Figura 7: Gráfico temperatura \times pontuação (máximo, médio e mínimo para cada temperatura).

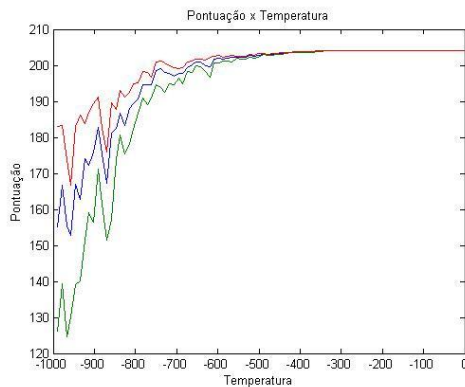


Figura 8: Gráfico temperatura \times pontuação (máximo, médio e mínimo para cada temperatura)

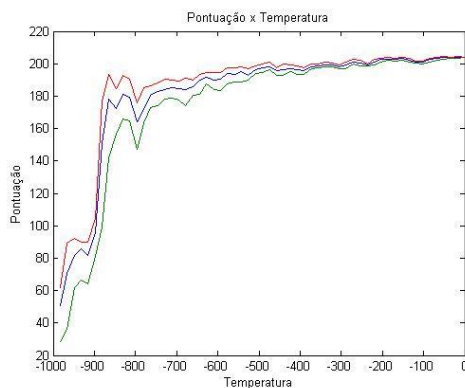


Figura 9: Gráfico temperatura \times pontuação (máximo, médio e mínimo para cada temperatura)

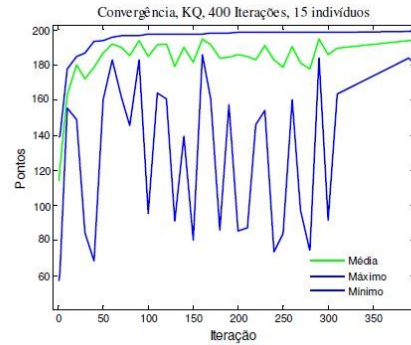


Figura 10: Evolução do GA (“Killer Queen”) utilizado indicando iterações \times pontuação (máximo, médio e mínimo para cada população).

Tabela 1: Pontuação obtida pelo modelo inicial e pontuação obtida na convergência final, para cada um dos 10 testes

Teste	Início	Final
1	30, 24	199, 5
2	111, 14	197, 9
3	59, 19	204, 3
4	28, 49	203, 1
5	29, 48	204, 5
6	110, 09	200, 4
7	118, 13	201, 4
8	106, 64	202, 0
9	94, 30	202, 7
10	136, 75	204, 2

cos do processamento pelo recozimento simulado, função objetivo pela temperatura de três exemplos com valor da pontuação do modelo inicial diferentes. A temperatura indica a evolução do recozimento simulado. Cada gráfico possui três curvas, valor de máximo, médio e mínimo assumidos pela função objetivo para cada temperatura. Todos os três atingem valores elevados de pontuação na convergência. A Fig. 10 exibe o comportamento do GA utilizado, existe uma grande influência do esquema de representação paramétrica utilizado, que possuía uma elevada quantidade de modelos inválidos.

A Tabela 1 apresenta o resultado obtido para 10 testes com o recozimento simulado e o esquema de representação propostos, estão indicados o valor da função objetivo inicial e o valor da função objetivo atingido na convergência. É possível observar que não importando o valor da pontuação do modelo inicial, o recozimento simulado alcançou um valor muito elevado na maioria das vezes.

7 Construção do Melhor Modelo e Teste

O modelo com a maior pontuação obtido pelo recozimento simulado foi construído em escala. A

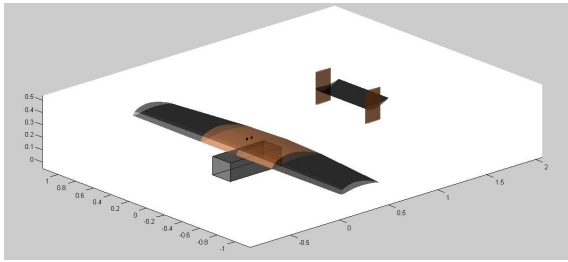


Figura 11: Modelo que obteve a maior pontuação exibido pelo MatLab.

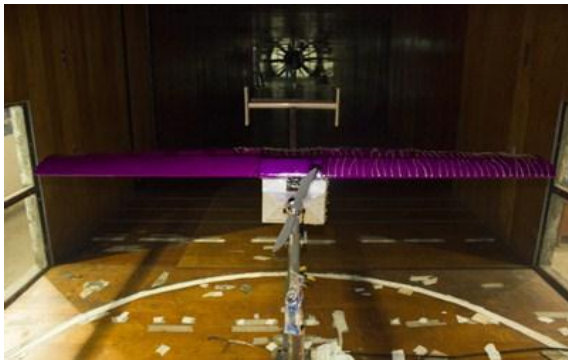


Figura 12: Modelo que obteve a maior pontuação construído em escala. Estão sendo feitos testes no túnel de vento.

Fig. 11 exibe o modelo criado graficamente em MatLab. Neste modelo foram adicionados *end plates* e a fuselagem foi modificada. O modelo foi testado em um túnel de vento para verificar a adequabilidade dos cálculos, que são baseados em suposições de perfeição, suposições distintas da realidade, mas em certo ponto pessimistas. A Fig. 12 o modelo em escala em teste no túnel de vento.

No teste de túnel de vento foram analisadas as forças e momentos atuantes no modelo através de uma balança aerodinâmica a uma velocidade equivalente à de cruzeiro do protótipo, em escala para que o número de Reynolds fosse mantido. Essas forças e momentos foram retiradas em vários ângulos de ataque para várias configurações de avião. Foram consideradas situações com *end plate*, sem *end plate*, e com mais de uma fuselagem; a fim de determinar a melhor configuração.

Os resultados obtidos a partir do teste foram muito satisfatórios e inclusive otimistas, mostrando que o avião tem a possibilidade de obter um desempenho ainda melhor que o previsto pelo algoritmo, que foi em parte pessimista quanto ao efeito da fuselagem no modelo.

A comparação mais eficaz não é entre o recozimento simulado e o GA, mas entre os dois esquemas de representação paramétrica. O primeiro, utilizando com o GA, era prejudicado pelas restrições que eram dificilmente satisfeitas. O esquema de representação paramétrica proposto e utilizado

com o recozimento simulado satisfaz todas as restrições durante a maior parte do processo. Sabe-se que a evolução em otimização com restrições apenas converge se soluções válidas forem a grande maioria.

8 Conclusões e Trabalhos Futuros

A combinação recozimento simulado e esquema de representação paramétrica demonstrou-se eficiente e eficaz, pois a convergência ocorre em tempo razoável para modelos com elevada pontuação. A validade do modelo ótimo encontrado foi verificada em ensaios de túnel de vento com um modelo construído em escala. Uma comparação direta entre o recozimento simulado e o GA, utilizando o mesmo esquema de representação, será feita em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Marcos de Sales Guerra Tsuzuki e Thiago de Castro Martins possuem suporte parcial do CNPq (respectivamente, processos 309.570/2010-7 e 306.415/2012-7). Edson Kenji Ueda possui suporte da CAPES e Emiliano Gonçalves de Castro possui suporte da FUNDESPA.

Referências

- Corana, A., Marchesi, M., Martini, C. and Riddella, S. (1987). Minimizing multimodal functions of continuous variables with the simulated annealing algorithm, *ACM Transactions on Mathematical Software* **13**: 262–280.
- Ingber, L. (1989). Very fast simulated re-annealing, *Mathematical and Computer Modelling* **12**: 967–973.
- Kirkpatrick, S., Gellat, C. D. and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing, *Science* **220**: 671–680.
- Martins, T. C. and Tsuzuki, M. S. G. (2009). Placement over containers with fixed dimensions solved with adaptive neighborhood simulated annealing, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences* **57**: 273–280.
- Martins, T. C. and Tsuzuki, M. S. G. (2010). Simulated annealing applied to the irregular rotational placement of shapes over containers with fixed dimensions, *Expert Systems with Applications* **37**: 1955–1972.
- Thengade, A. and Dondal, R. (2012). Article: Genetic algorithm - survey paper, *IJCA Proceedings on National Conference on Recent Trends in Computing NCRTC(5)*: 25–29. Published by Foundation of Computer Science, New York, USA.