

OTIMIZAÇÃO DA ASA DE GEOMETRIA MISTA PARA UM VANT, COM FOCO NA DISTRIBUIÇÃO DE SUSTENTAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE PROPAGAÇÃO DE ESTOL

Rogério Rodrigues da Silva Filho (UFMG) E-mail: filhorrs@gmail.com
Jefferson Luiz Mendonça Junior (UPF) E-mail: jeffersonluizmendoncajunior@gmail.com

Resumo: O presente estudo utiliza técnicas de otimização na busca da melhor solução para a distribuição de áreas das diferentes seções geométricas de uma asa mista retangular-trapezoidal, minimizando a diferença da distribuição da corda a longo da envergadura entre uma asa mista e uma asa elíptica, na tentativa de aproximar a distribuição de sustentação da asa mista em uma distribuição elíptica, que teoricamente possui o menor arrasto induzido entre os diferentes formatos geométricos. A metodologia de otimização foi aplicada no estudo de caso de um veículo aéreo não tripulado (VANT), onde a técnica de otimização forneceu novos parâmetros geométricos da asa. Simulações numéricas apresentaram que a nova asa teve seu objetivo alcançado, pois apresentou uma distribuição de sustentação mais próxima da distribuição ótima (elíptica). Porém, verificou-se características não desejadas na propagação de estol, onde houve uma tendência de início de estol na ponta de asa, e assim, prejudicando a eficiência das superfícies controle de rolagem da aeronave. Para a melhoria das características de estol, aplicou-se diferentes combinações de torção geométrica, ao longo das seções retangular e trapezoidal, e então, obteve-se a melhor configuração de torção para a asa mista, sem que a mesma sofresse grande penalidade na característica da distribuição de sustentação obtida pela otimização.

Palavras-chave: Aerodinâmica, otimização, asa de geometria mista, distribuição de sustentação, estol.

COMBINED WING PLANFORM OPTIMIZATION FOR AN UAV WITH FOCUS ON LIFT DISTRIBUTION AND STALL CHARACTERISTICS

Abstract: The present study uses optimization techniques in the search for the best solution of the distribution of areas of the different geometric sections of a rectangular-trapezoidal combined wing, minimizing the difference of the chord distribution along the wingspan between a combined wing and an elliptical wing, in an attempt to approximate the lift distribution of the combined wing in an elliptic distribution, which theoretically has the least induced drag between the different geometric formats. The optimization methodology was applied in the case study of an unmanned aerial vehicle (UAV), where the optimization technique provided new geometric parameters to the wing. Numerical simulations showed that the new wing had its goal achieved, because it presented a lift distribution closer to the optimal distribution (elliptic). However, there were undesirable features in stall propagation, where there was a tendency to stall start at the wing tip, and thus impairing the efficiency of the roll control surfaces of the aircraft. In order to improve stall characteristics, different combinations of geometric torsion were applied along the rectangular and trapezoidal sections, and the best torsion configuration was obtained for the combined wing, without it suffering major penalty in the characteristic of the lift distribution obtained by the optimization.

Keywords: Aerodynamics, optimization, combined wing planform, lift distribution, stall.

1. Introdução

Nos projetos aeronáuticos, desde os seus primórdios até os tempos atuais, busca-se aeronaves aerodinamicamente mais eficientes. Sendo assim, a asa de uma aeronave é um dos componentes que recebe maior atenção durante seu desenvolvimento.

Existem diversas formas geométricas de asa. Como exemplo, para aviões de baixa velocidade as geometrias de asas mais utilizadas são de formato elíptico, retangular e trapezoidal, sendo que cada formato possui suas vantagens e desvantagens e que estão principalmente relacionados ao arrasto induzido, características de propagação de estol distribuição de sustentação e manufatura (BARROS, 2001).

A asa elíptica é o formato de asa que possui menor arrasto devido à sustentação (considerando uma asa sem torção), assim, tendo ótima eficiência aerodinâmica. Porém, o estol acontece em toda sua extensão de forma abrupta, o que pode levar em uma perda prematura de controle de rolagem devido ao estol na região das superfícies de controle, além disso, sua construção é mais complexa do que as demais formas. Por esses motivos, asas de formatos retangulares e trapezoidais são amplamente utilizadas na aviação leve (BARROS, 2001).

Uma técnica utilizada para a melhoria da eficiência aerodinâmica, sem grandes penalidades nas características de propagação de estol, é a construção de asas mistas, podendo ser retangular-trapezoidal, bi-trapezoidal ou até n -trapezoidal de n divisões. Ainda, o uso de torções geométricas e/ou aerodinâmicas ao longo da envergadura em asas mistas podem auxiliar na redução de arrasto e melhoria nas características de estol (WORTMANN, 1965). Asas mistas são amplamente utilizados em planadores de alta eficiência aerodinâmica, por exemplo.

O presente trabalho utiliza técnicas de otimização na busca da melhor solução da distribuição de áreas das diferentes seções geométricas de uma asa mista retangular-trapezoidal, na tentativa de aproximar a distribuição de sustentação da asa mista em uma distribuição elíptica, e ainda, a aplicação de torção geométrica nas seções da asa como uma solução de melhoria características de propagação de estol. É então, realizado um estudo de caso para uma asa de um veículo aéreo não tripulado, onde comparações de distribuição de sustentação serão feitas com base na literatura e dados obtido por *softwares* para o presente modelo.

2. Metodologia

O estudo é realizado considerando as características aerodinâmicas de um escoamento subsônico e incompressível, presente em aeronaves leves de baixa velocidade, sendo assim a base teórica utilizada no presente estudo de otimização é apresentado nas subseções seguintes.

2.1. Distribuição de sustentação e formatos geométricos de asa

Segundo Anderson (2007), partindo da teoria da linha sustentadora de Prandtl, a distribuição de circulação (Γ), ao longo da envergadura de uma asa sem enflechamento e torção, é dada por

$$\Gamma(y) = \Gamma_0 \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{b}\right)^2} \quad (1)$$

onde Γ_0 é a circulação na origem ($y = 0$), b é a envergadura da asa e y é uma distância arbitrária ao longo da envergadura. Nota-se que a circulação varia de forma elíptica ao longo da envergadura.

O teorema de Kutta-Joukowski diz que a sustentação por unidade de envergadura (L'), em uma asa sem torção, é diretamente proporcional à circulação, ou seja,

$$L' = \rho_\infty V_\infty \Gamma \quad (2)$$

onde ρ_∞ e V_∞ são a massa específica e a velocidade do escoamento, respectivamente. Substituindo a Eq. (1) em (2), temos a distribuição da sustentação ao longo de uma asa finita, ou seja, uma distribuição elíptica de sustentação:

$$L'(y) = \rho_\infty V_\infty \Gamma_0 \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{b}\right)^2} \quad (3)$$

Outra propriedade da distribuição elíptica, segundo Anderson (2007), considerando uma asa sem torção e enflechamento, pode ser dada pela Eq. (4), que relaciona a variação da corda da asa ao longo da envergadura.

$$c(y) = \frac{L'(y)}{q_{\infty} c_l} \quad (4)$$

onde q_{∞} é a pressão dinâmica do escoamento e c_l o coeficiente de sustentação local sendo ambos constantes ao longo da envergadura. A Eq. (4) nos diz que a corda varia elipticamente ao longo da envergadura, ou seja, para uma distribuição de sustentação elíptica, a forma em planta para essa condição também será elíptica.

Outra característica obtida pela teoria da linha sustentadora de Prandtl é que o efeito de *downwash* é constante ao longo da envergadura para uma distribuição de sustentação elíptica, e conseqüentemente, o ângulo de ataque induzido (α_i) também é constante ao longo da envergadura (ANDERSON, 2007).

Ainda, como resultado da teoria da linha sustentadora de Prandtl, para uma asa finita com distribuição de sustentação qualquer, o arrasto induzido pode ser estimado pela Eq. (5),

$$C_{D,i} = \frac{C_L^2}{\pi e AR} \quad (5)$$

onde C_L é o coeficiente de sustentação, AR é a razão de aspecto e e é o fator de eficiência de envergadura, onde $e \leq 1$. Para uma distribuição de sustentação elíptica, o fator e será 1. Com isso conclui-se que a distribuição de sustentação que possui o menor arrasto induzido é a distribuição elíptica de sustentação (enfatizando que esse conceito é aplicável a uma asa sem torção). Esse é o motivo do interesse prático em uma distribuição elíptica em uma asa (ANDERSON, 2007).

2.1.1. Formatos geométricos e suas características de estol

Apesar do grande interesse, por conta do arrasto induzido, de se ter uma asa em formato elíptico, esse tipo de asa possui principalmente duas desvantagens: segundo Barros (2001), são difíceis e caras de construir e possuem características de estol precárias (considerando asa sem torção), pois o estol acontece de forma abrupta em praticamente toda sua extensão, afetando as superfícies de controle (aileron), o que é um efeito indesejável. Segundo vários autores (HOERNER, 1985; SIMONS, 1994; ANDERSON, 2017), isso acontece por que a asa elíptica possui o coeficiente local de sustentação constante ao longo de toda envergadura, como pode ser observado no denominador da Eq. (4) e ilustrado no gráfico da Fig. 1(a) pela reta tracejada.

Por outro lado, a asa retangular é mais barata e fácil de se fabricar, além de ter uma boa característica de estol, já que inicia suavemente na raiz e, conseqüentemente, as pontas da asa (e ailerons) estolam por último. Porém, segundo Anderson (2001), a asa retangular possui maior arrasto induzido por gerar uma distribuição de sustentação distante da ótima, como pode ser observado na Fig. 1(b). Raymer (1992), sugere que uma asa retangular, sem torção, possui em torno de 7% mais arrasto devido à sustentação em relação a uma asa elíptica com mesmo AR .

Asas trapezoidais possuem características intermediárias entre as asas retangulares e elípticas, e dependem da maior ou menor razão de afilamento (λ), que é definido pela razão entre o tamanho da corda na ponta (*tip*) pelo tamanho da corda na raiz (*root*) da asa, ou seja,

$$\lambda = \frac{c_t}{c_r} \quad (6)$$

Barros (2001) cita que asas trapezoidais são boas estruturalmente e no geral, possuem

menor arrasto induzido do que as asas retangulares (dependendo do valor de λ) e, segundo o autor, uma asa trapezoidal com $\lambda = 0,5$ apresenta uma resistência induzida 3% superior a àquela da asa elíptica. Por outro lado, possuem algum grau de dificuldade de construção, já que o tamanho das nervuras é diferente. Além disso, possuem características de estol intermediária entre asas elípticas e retangulares, sendo que o início do estol pode acontecer próximo a raiz para valores grandes de λ (tendendo ao formato retangular, onde $\lambda = 1$) e próximo a ponta, para valores pequenos de λ . Segundo Torenbeek (1976), uma asa com afilamento em torno de $\lambda = 0,4$ terá a tendência de iniciar o estol em 60% da semi-envergadura, próxima ao aileron. A Fig. 1(c) apresenta a propagação do estol para asas trapezoidais com $\lambda = 0,5$ e $\lambda = 0,2$, além da elíptica e retangular.

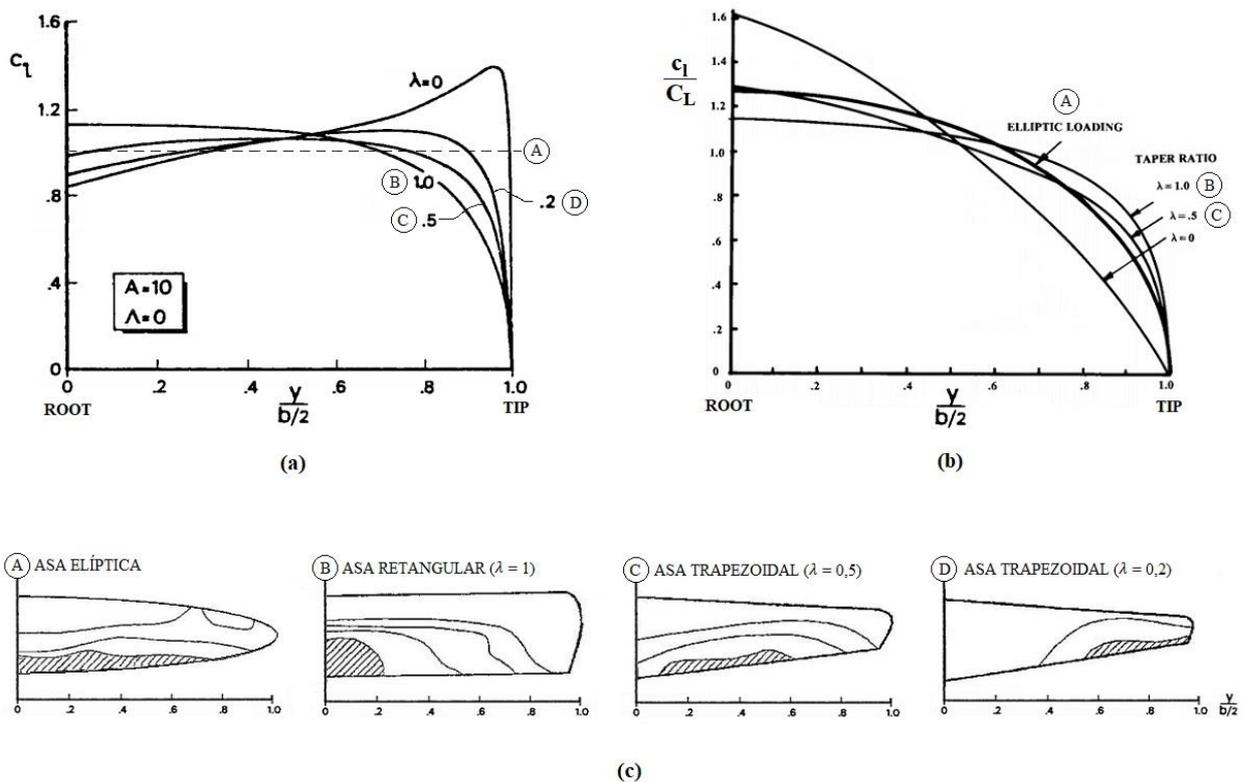


Figura 1 - (a) Distribuição do coeficiente local de sustentação ao longo da envergadura, operando com $C_L = 1$ (TORENBEEK, 1976, editado); (b) Distribuição de sustentação ao longo da envergadura (RAYMER, 1992, editado); (c) Propagação de estol para diferentes formas geométricas (BARROS, 2001, editado).

Nota-se, comparando o gráfico (a) e as propagações de estol (c), na Fig. 1, que o início do estol tende a iniciar onde tem-se um coeficiente local de sustentação, c_l , maior em relação ao valor constante para uma asa elíptica, ou seja, as regiões de maiores c_l chegarão ao seu coeficiente de sustentação máximo por primeiro.

Na busca do menor arrasto induzido, sem penalizar características de a propagação de estol, uma técnica utilizada por projetistas é a utilização de asa mista (combinadas), onde temos diferentes formas geométricas ao longo da envergadura.

2.1.2. Asas mistas

Asas mistas são amplamente utilizados em aeronaves que priorizam a eficiência aerodinâmica. Segundo Barros (2001), asa retangular-trapezoidal possui características

intermediárias entre as asas retangulares e trapezoidais, em todos os itens avaliados na seção anterior; já asas bi-trapezoidais possuem construção um pouco mais elaborada, porém tendem a ter menor arrasto induzido pelo fato de seu formato se aproximar ao formato elíptico.

A Fig. 2 apresenta a relação entre o coeficiente de sustentação e o acréscimo do coeficiente de arrasto induzido ΔC_{Di} , sendo ΔC_{Di} a diferença entre o arrasto induzido da asa analisada e uma asa elíptica, ou seja, $\Delta C_{Di} = C_{Di} - C_{Di_{ell}}$. São analisadas asas de diferentes formas em planta, com diferentes torções (ϵ) e AR constante (WORTMANN, 1965).

Considerando uma asa sem torção ($\epsilon = 0$), observa-se na Fig. 2 que os formatos retangular (a) e trapezoidal (b) são as que apresentam maiores diferenças de arrasto induzido. As asas retangular-trapezoidal em (c) e (d) possuem a divisão das áreas em 2/3 e 1/3 da envergadura, respectivamente, e a asa bi-trapezoidal (e) é a que possui maior eficiência aerodinâmica entre as asas mista (de mesmo AR e sem torção).

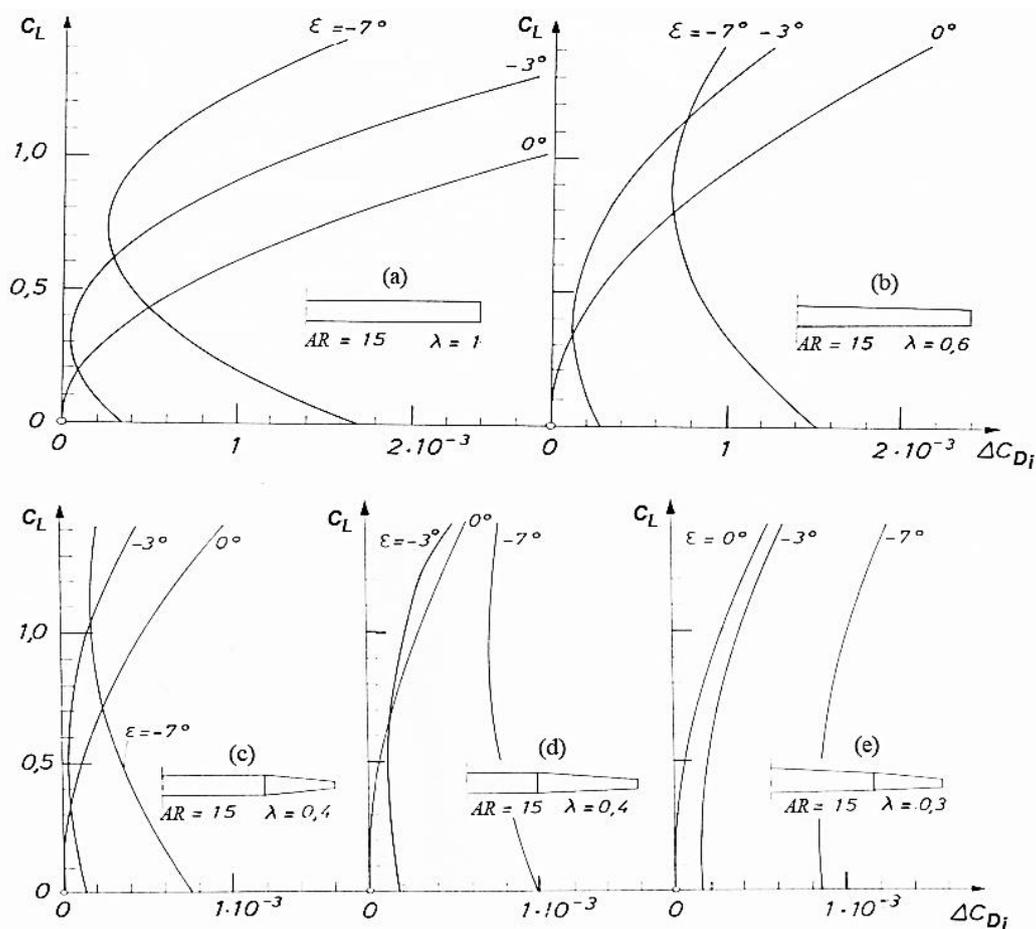


Figura 2 - Relação entre o coeficiente de sustentação e o acréscimo do coeficiente de arrasto induzido, para diferentes formas geométricas de asa e com diferentes torções (WORTMANN, 1965, editado).

Wortmann (1965), demonstra que, ao aplicar uma torção (ϵ) de -3° em asas mista, as asas retangular-trapezoidal passam a ter o menor arrasto induzido em elevados valores de C_L .

2.2. Otimização

A partir dos estudos citados anteriormente, conclui-se que uma asa de geometria mista pode ter uma eficiência próximo a uma asa ótima (distribuição elíptica de sustentação) pelo fato da

aproximação geométrica da forma ótima (forma geométrica elíptica). Porém, qual é o tamanho de cada seção e em que posição na envergadura essa mudança de seção deve ser feita para que tenhamos uma melhor solução possível? A Eq. (4) mostra que a corda varia elípticamente ao longo da envergadura para uma asa ótima, e a partir disso, Sóbester (2015) cita que a busca das incógnitas pode ser feita minimizando a diferença das cordas de uma asa qualquer em relação a uma asa elíptica, isto é,

$$\min_{y, c(0,1,2)} \int_0^{b/2} c(y) dy - \int_0^{b/2} \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{b}\right)^2} dy \quad (7)$$

Sujeito a restrições descritas no estudo de caso, em seções seguintes. A primeira parcela da Eq. (7) deve ser dividida em duas partes onde considera-se seções de diferentes formatos geométricos.

No presente estudo utilizou-se o algoritmo de otimização dito *algoritmo genético*. Segundo Linden (2012), esse algoritmo é uma técnica de busca estocástica que é formado por um conjunto de regras e processos com operações finitas. Os algoritmos genéticos seguem as leis biológicas da transmissão de caracteres hereditários nos indivíduos e os mecanismos que asseguram essa transmissão. A evolução geralmente se inicia a partir de um conjunto de soluções criados aleatoriamente e é realizada por meio de gerações. A cada geração, a adaptação de cada solução na população é avaliada, alguns indivíduos são selecionados para a próxima geração, e recombinados ou mutados para formar uma nova população. A nova população então é utilizada como entrada para a próxima iteração do algoritmo.

2.3. Análise numérica

Para a obtenção da distribuição da sustentação e da distribuição do coeficiente local de sustentação da asa mista obtida pela melhor solução da otimização, foi-se utilizado o *software XFLR5*, que é um *software* livre e que tem o intuito de promover uma interface amigável do código *XFOil* (GUIDELINE FOR XFLR5, 2009).

Um dos métodos numéricos presentes no *XFLR5*, e que foi utilizado nas análises do presente trabalho, é o *Vortex Lattice Method – VLM*. Segundo Margason et al. (1985), VLM é um método numérico que foi desenvolvido sobre a teoria de escoamento potencial e representa a asa como uma superfície que é dividida em seções onde vórtices de ferradura são sobrepostos, e a velocidade induzida de cada vórtice, em um ponto de uma seção específica, é calculada usando a lei de Biot-Savart. O somatório de todos pontos de controle na asa produz um conjunto de equações algébricas que devem satisfazer as condições de contorno do escoamento sobre a asa. Os vórtices são relacionados com a circulação e com a diferença de pressão entre o extradorso e intradorso da asa. A integração das diferenças de pressão fornece a força e momento total. O método VLM possui algumas limitações pois considera que o escoamento é incompressível, invíscido e irrotacional, além de negligenciar a influência de espessura e considerar pequenos ângulos de ataque e derrapagem.

Margason et al. (1985) comenta que “O VLM prevê os dados experimentais muito bem, devido que o método *vortex lattice* negligencia o efeito da espessura e da viscosidade. Para muitos casos, o efeito da viscosidade compensa o efeito da espessura, rendendo uma boa concordância entre o VLM e o experimento” (tradução do autor).

3. Estudo de caso

Para o estudo de caso de otimização de uma asa mista, utiliza-se um veículo aéreo não tripulado (VANT), projetado para a competição SAE Brasil AeroDesign. É uma aeronave de baixa velocidade que tem o intuito de carregar elevada carga útil, sendo assim, deve operar com

elevados valores de C_L em baixas velocidades. A Fig. 3 apresenta a aeronave e suas características.

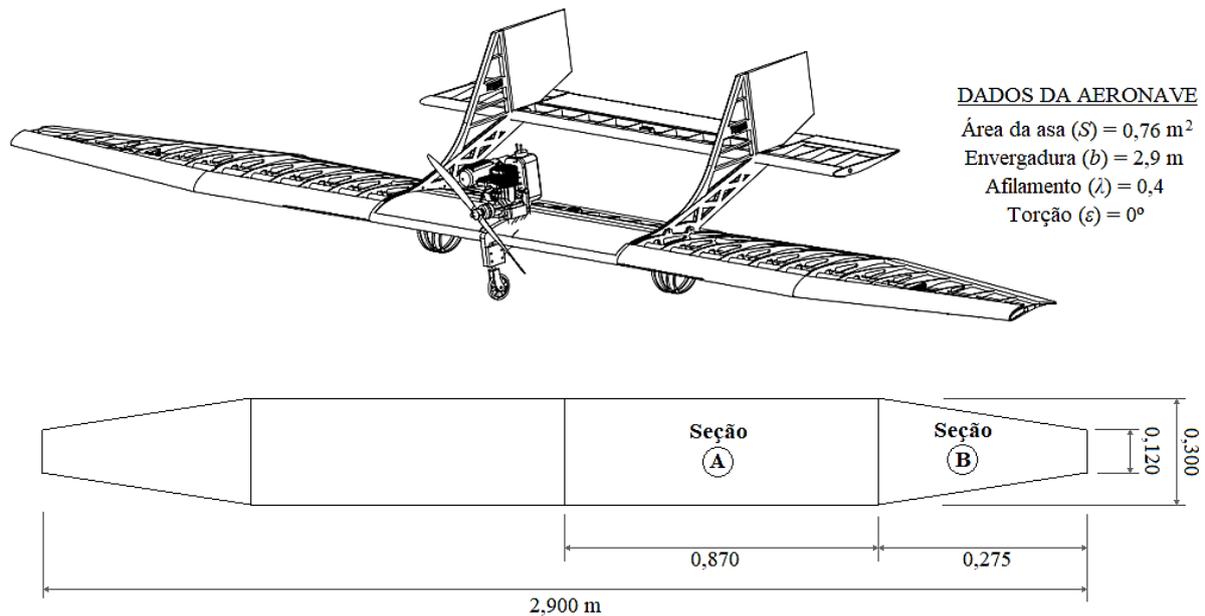


Figura 3 – Aeronave para o estudo de caso. Vista geral, vista superior da asa e dados geométricos.

A aeronave possui uma asa mista retangular-trapezoidal, sendo a seção A retangular e a seção B trapezoidal, conforme a Fig. 3. Para o estudo em questão, são aplicadas algumas restrições geométricas para a otimização, descritas na Tab. 1.

Tabela 1 - Restrições geométricas para a otimização.

Inputs	Símbolo	Formulação	Restrições
Área total	S_w	$S_w = 2(S_A + S_B)$	$S_w = 0,76 \text{ m}^2$
Semi-envergadura	$b/2$	$b/2 = l_A + l_b$	$b/2 = 1,45 \text{ m}$
Afilamento da seção A	λ_A	$\lambda_A = c_0/c_1$	$\lambda_A = 1$ (retangular)
Afilamento da seção B	λ_B	$\lambda_B = c_2/c_1$, onde $c_1 = c_0$	$\lambda_B = 0,4$
Corda na raiz	c_0	-	$0,300 \leq c_0 \leq 0,350 \text{ m}$
Corda na ponta	c_2	-	$0,100 \leq c_2 \leq 0,150 \text{ m}$
Posição de transição da seção A para B	y	$y = l_A$	$0 < y < b/2$
Torção geométrica nas seções	ε	-	$0 \leq \varepsilon \leq -4^\circ$

Fonte: Autor.

A seção seguinte apresenta os resultados obtidos pelo processo de otimização e descreve a nova asa de geometria mista obtida. Serão feitas análises numéricas, além de considerações sobre o comportamento aerodinâmico do novo formato geométrico da asa.

3.1 Resultados

Os valores das cordas da raiz e da ponta, assim como a posição na envergadura onde ocorre a mudança de seção *A* para *B*, é obtido pela mínima diferença da Eq. (7). Considerando as restrições da Tab. 1 e que a seção *A* é retangular e a seção *B* é trapezoidal, os novos parâmetros geométricos da melhor solução de otimização da asa de geometria mista são apresentados na Fig. 4.

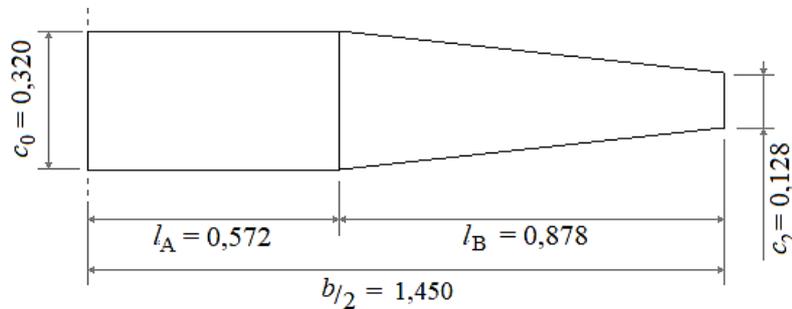


Figura 4 - Geometria da semi-envergadura da nova asa de geometria mista obtida pela otimização.

A Fig. 5(a) apresenta a distribuição de sustentação ao longo da envergadura para a asa inicial e para a nova asa obtida pelo processo de otimização. Nota-se que o novo formato geométrico de asa possui a distribuição de sustentação mais próxima da distribuição elíptica, o que é um fator positivo na redução do arrasto induzido. Porém, pela Fig. 5(b) observa-se que a asa otimizada tem a tendência de ter o início do estol na ponta de asa, o que é uma característica indesejada.

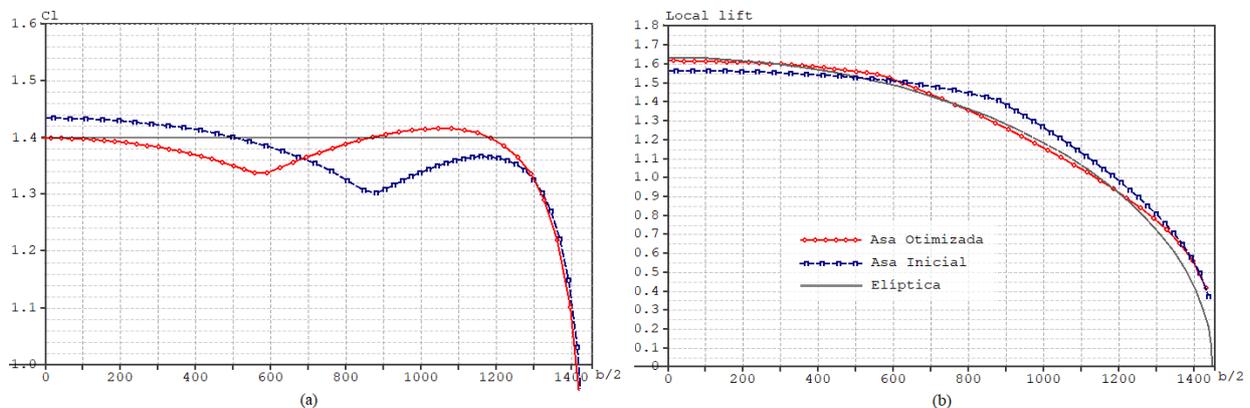


Figura 5 - Distribuição (a) coeficiente de sustentação local e (b) sustentação, ao longo da semi-envergadura (sem torção geométrica e $C_L = 1,4$).

A solução para a melhoria das características de estol proposta pelos estudos de Wortmann (1965) é a aplicação de torção ao longo da envergadura. Com isso, aplicou-se diferentes combinações de torção geométrica nas seções da asa mista. A Fig. 6 apresenta os gráficos da distribuição do coeficiente local de sustentação (a) e distribuição de sustentação (b), ao longo da semi-envergadura, para torção geométrica apenas na seção *B*.

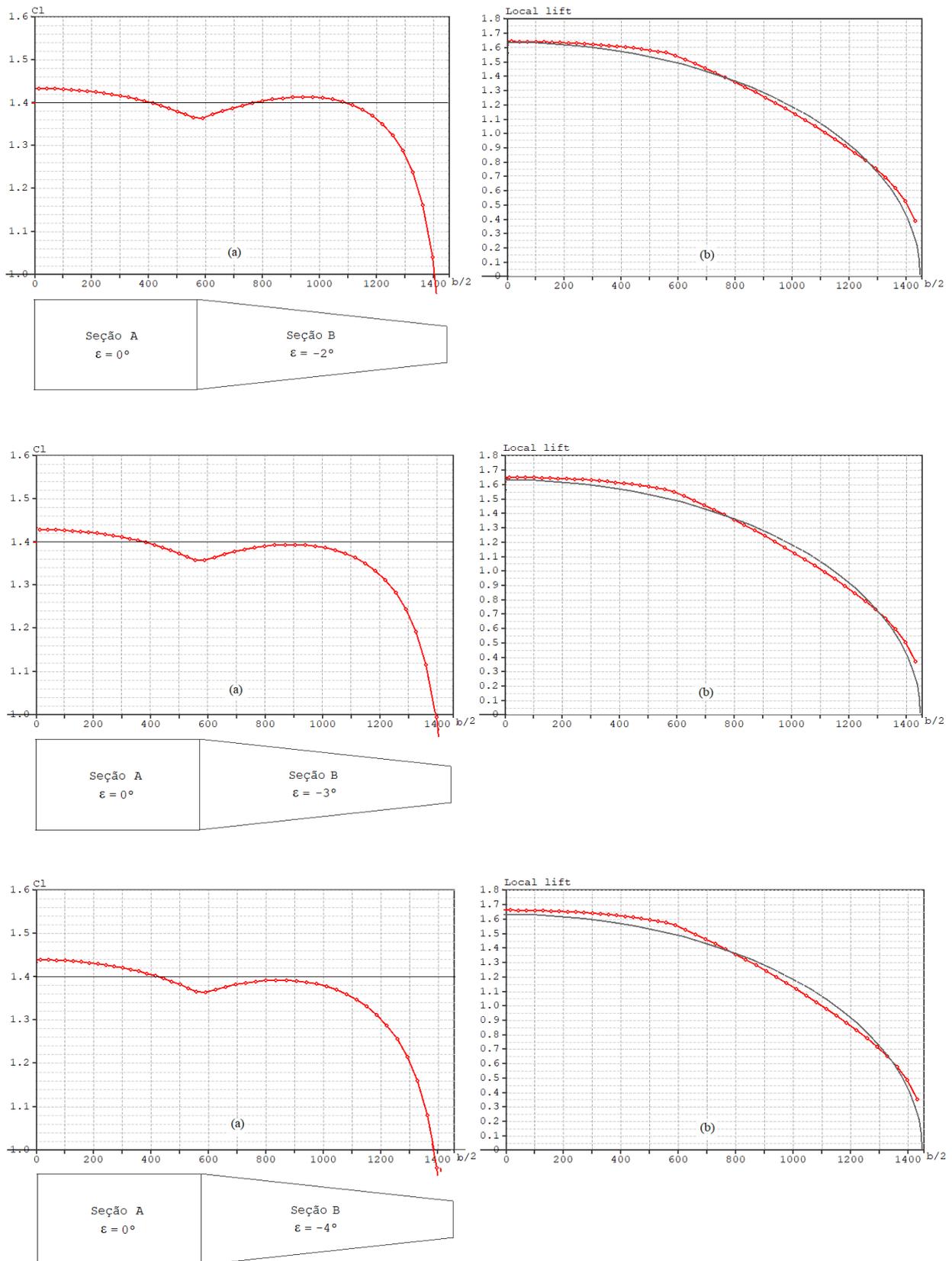


Figura 6 - Distribuição (a) do coeficiente de sustentação local e (b) da sustentação, ao longo da semi-envergadura, com torção geométrica apenas na seção B de -2° (superior), -3° (centro) e -4° (inferior) ($C_L = 1,4$).

Para as asas com torção apenas na seção trapezoidal (seção *B*), o coeficiente de sustentação local torna-se menor na região da ponta da asa a medida que o ângulo de torção torna-se mais negativo, porém quanto mais torção a asa possuir, maior é o afastamento da distribuição de sustentação da asa em relação a uma distribuição elíptica. Ou seja, a busca de uma melhor característica de propagação de estol, com a torção apenas da seção *B*, afasta a asa da distribuição de sustentação que fornece o menor arrasto induzido.

Outras análises são realizadas, agora com torção geométrica em ambas as seções. Os resultados são apresentados pela Fig. 7.

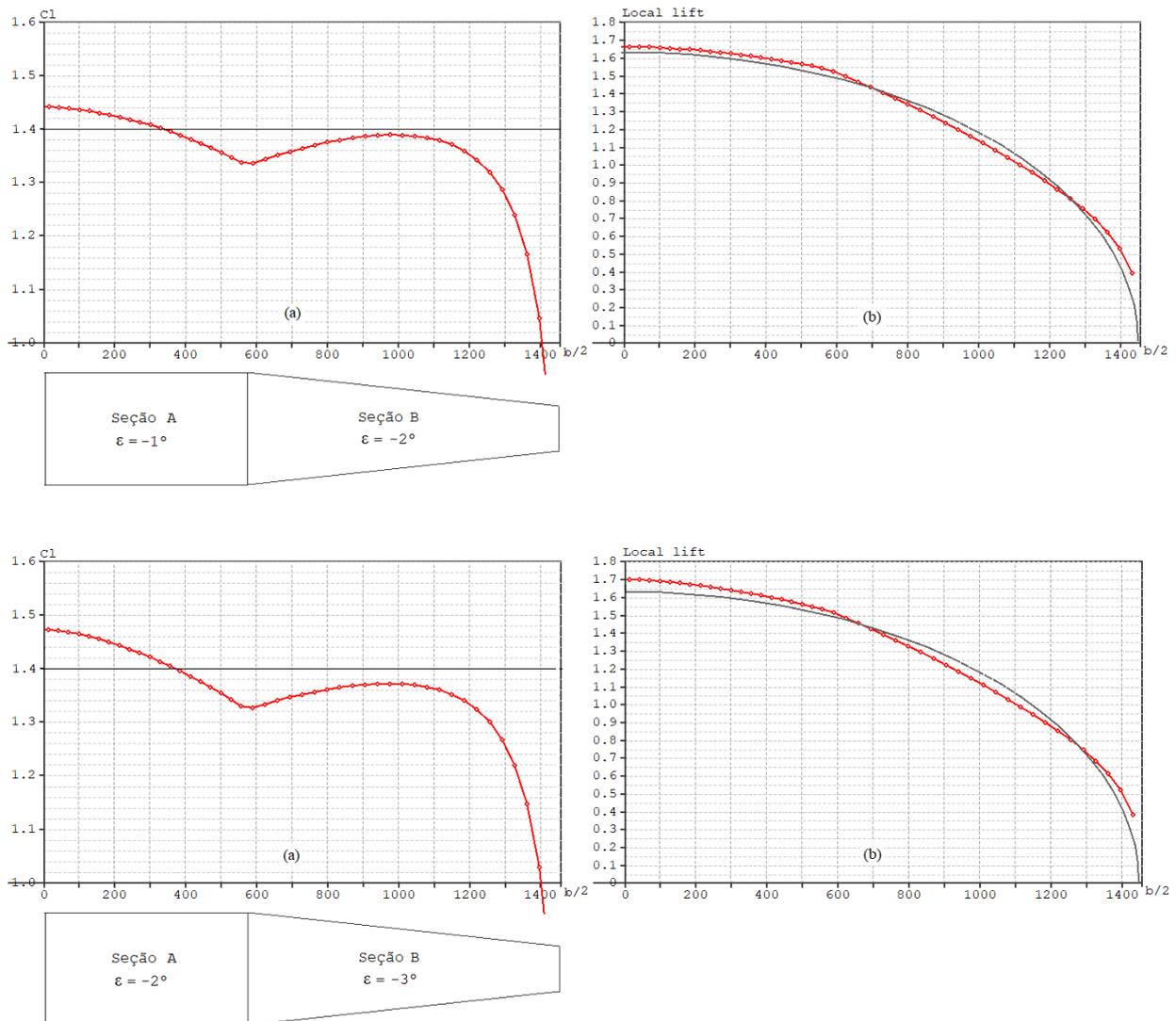


Figura 7 - Distribuição (a) do coeficiente de sustentação local e (b) da sustentação, ao longo da semi-envergadura, com torção geométrica em ambas as seções. Asa superior com torção de -1° na seção A e -2° na seção B; Asa inferior com torção de -2° na seção A e -3° na seção B ($C_L = 1,4$).

As asas com torção tanto na seção retangular (seção *A*), quanto na seção trapezoidal (seção *B*), apresentam boas características de propagação de estol, pois os maiores valores de coeficiente de sustentação local são obtidos próximo a raiz da asa, e como no caso anterior, quanto mais torção é aplicado, maior é o afastamento da distribuição de sustentação elíptica.

A asa mista obtida pela melhor solução de otimização, sem torção, é a que possui a distribuição de sustentação mais próxima da ideal, demonstrado na Fig. 5(a), porém é a pior na questão das características de propagação de estol, tendendo com que o estol inicie entre 65% a 80% da envergadura, assim afetando as superfícies de controle de rolagem.

Já a asa com $\varepsilon = -1^\circ$ na seção *A* e com $\varepsilon = -2^\circ$ na seção *B* (asa superior na Fig. 7) é a asa que demonstrou uma distribuição de sustentação próxima a distribuição elíptica e uma boa tendência ao início de estol na raiz, sendo a melhor opção de torção para a asa otimizada.

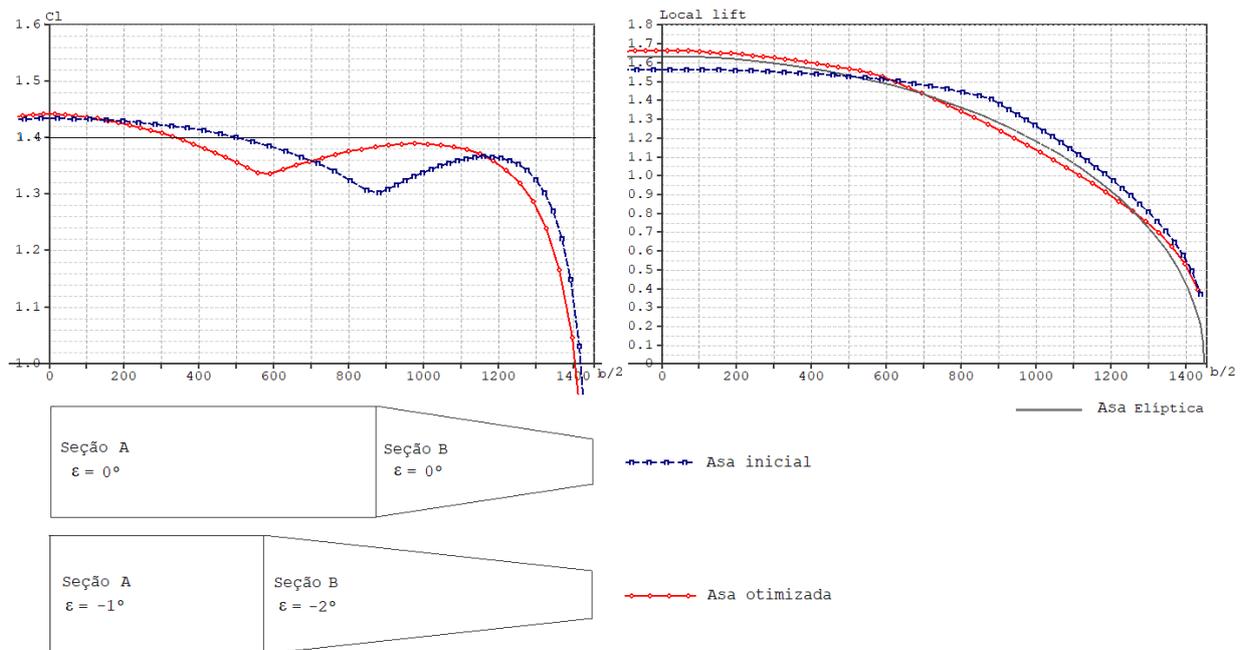


Figura 8 - Comparação da distribuição do coeficiente de sustentação local e da sustentação, em relação a semi-envergadura, da asa inicial e da asa com melhor solução de otimização. ($C_L = 1,4$).

A Fig. 8 apresenta a comparação entre a asa inicial e a asa otimizada com $\varepsilon = -1^\circ$ na seção *A* e $\varepsilon = -2^\circ$ na seção *B*. Nota-se uma maior aproximação da distribuição elíptica para a asa otimizada em relação a asa inicial, e pela distribuição do coeficiente de sustentação local, a nova configuração de asa possui boa característica de propagação de estol.

4. Conclusões

Pelas análises numéricas, notamos que a nova asa obtida pela minimização da diferença entre a variação da corda ao longo da envergadura de uma asa de geometria mista e a variação para uma asa elíptica, teve seu objetivo alcançado, pois apresentou a distribuição de sustentação mais próxima da distribuição ótima (elíptica). Porém, verificou-se uma característica não desejada na propagação de estol, onde houve uma tendência de início de estol na ponta de asa, e assim, prejudicando as superfícies controle de rolagem da aeronave.

Para a melhoria das características de estol, e baseado nos estudos realizados por Wortmann em 1965, aplicou-se diferentes combinações de torção geométrica, ao longo das seções e a melhor configuração para a asa mista é a que temos -1° de torção geométrica na seção *A* (retangular) e -2° na seção *B* (trapezoidal), sem que a mesma sofra grande penalidade nas características de distribuição de sustentação obtidas pela otimização.

5. Referências

ANDERSON, J.D. *Fundamentals of Aerodynamics*. 4. ed. New York: Ed. McGraw-Hill, 2007.

BARROS, C.P. *Uma Metodologia para Desenvolvimento de Projeto de Aeronaves Leves Subsônicas*, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

GUIDELINE FOR XFLR5. *Guideline for XFLR5. Analysis of Foils and Wings Operating at Low Reynolds Numbers*, 2009.

HOERNER, S.H. *Fluid-Dynamic Lift*. Bakersfield: Publicado pelo autor, 1985.

LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos: Uma importante Ferramenta da Inteligência Computacional*. Rio de Janeiro: Ed. Ciência Moderna, 2012.

MARGASON, R.J.; KJELGAARD, S.O.; SELLERS, W.L.; MORRIS, C.E.K.; WALKEY, K.B. & SHIELDS, E.W. *Subsonic Panel Methods – A Comparison of Several Production Codes*. 23rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 85-0280, 1985.

RAYMER, D.P. *Aircraft Design: A Conceptual Approach*. Washington: AIAA Education Series, 1992.

SIMONS, M. *Model Aircraft Aerodynamics*. Hemel Hempstead: Ed. Angus Book, 1994.

SÓBESTER, A. *Aircraft Aerodynamic Design: Geometry and Optimization*. Chichester: Ed. John Wiley & Sons, 2015.

TORENBEEK, E. *Synthesis of Subsonic Airplane Design*. Rotterdam: Delf University Press, 1976.

WORTMANN, F.X. *Widerstandsverminderung bei Segelflugzeugen*. Schweizer Aero-Revue, Vol. 40, p. 723-728, 1965.