

COMPARAÇÃO DE ESTOL PARA MÚLTIPLOS PERFIS UTILIZADA NA COMPETIÇÃO SAE AERODESIGN

Kauê Almeida da Cruz*

Lucas Eduardo Porelli dos Santos**

Marcos Antonio de Souza Lourenço***

* UTFPR-CP, kaue16cruz@hotmail.com

** UTFPR-CP, lsantos.2022@alunos.utfpr.edu.br

*** UTFPR-CP, mlourenco@utfpr.edu.br

Resumo: Este artigo apresenta uma análise quantitativa comparativa de perfis aerodinâmicos de alta sustentação empregados na competição SAE Aerodesign, cujo principal objetivo é estimular o desenvolvimento de conhecimento e habilidades na área aeronáutica por meio de desafios de projeto. Um dos aspectos fundamentais deste estudo consiste na determinação do coeficiente máximo de sustentação e do correspondente ângulo de ataque de estol, pois o estol caracteriza-se pela perda súbita de sustentação decorrente da separação do escoamento do ar em relação à superfície do perfil. Para selecionar o perfil com maior ângulo de estol, foram avaliados os perfis Eppler 423 e Selig S1223, disponibilizados pelo banco de dados Airfoil Tools, além do perfil otimizado pela equipe, ID3255B. As simulações foram realizadas no software XFLR5, considerando condições padronizadas de número de Reynolds e variação do ângulo de ataque de -5° a 20° , em incrementos de $0,5^\circ$. A análise dos resultados envolveu a comparação das curvas de sustentação por ângulo de ataque, permitindo avaliar a eficiência de sustentação de cada geometria. Por fim, parâmetros como o ângulo de estol e a margem de segurança operacional foram utilizados para recomendar o perfil mais adequado à competição, contribuindo para o avanço de estratégias de projeto em aerodesign de alta eficiência.

Palavras-chave: Estol. Aerodinâmica. XFLR5. Perfis

1. Introdução

A aerodinâmica é uma área que vem ganhando cada vez mais destaque, por estar diretamente relacionada ao desempenho de veículos, sejam eles terrestres ou aéreos. Como qualquer aplicação de mecânica dos fluidos, as análises apresentadas aqui farão uso dos conceitos de campos de pressão, camada limite, descolamento da camada limite, número de Reynolds, propriedades do fluido, entre outros parâmetros que serão abordados ao longo deste trabalho (CHISTIFANI, 2024).

No projeto de uma aeronave, o subsistema aerodinâmico é um dos primeiros a ser desenvolvido, uma vez que influencia diretamente diversas outras áreas. Busca-se, desde o início, um desempenho aerodinâmico elevado, o qual deve estar em harmonia com os demais subsistemas da aeronave (SOUZA et al., 2016).

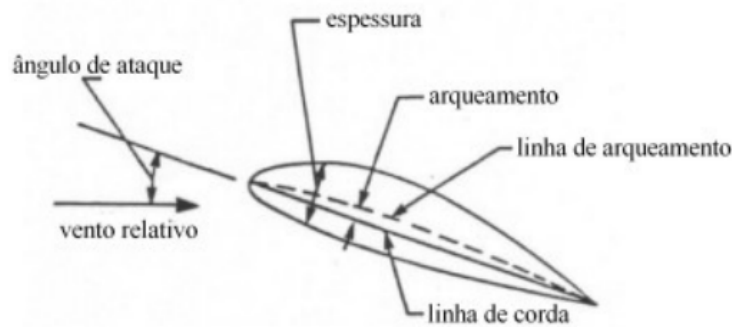
A asa é o principal componente de uma aeronave no que diz respeito à geração de sustentação, sendo formada por perfis aerodinâmicos que, além de definirem sua geometria, têm como função fundamental interagir com o fluxo de ar para produzir sustentação. Por isso, a escolha de um perfil adequado é essencial para o sucesso do projeto. Para que a asa seja mais eficiente, é necessário que ela proporcione alta sustentação (Cl) com o menor arrasto (Cd) possível, otimizando, assim, o desempenho aerodinâmico da aeronave (DANTAS, 2014).

Também é possível determinar o ângulo de ataque máximo (α_{max}) antes que ocorra o estol, fenômeno que acontece quando o ângulo ultrapassa um limite crítico e a camada limite se desprende da superfície do perfil pois não tem mais região de baixa pressão atuando na parte superior do perfil, e o equilíbrio de força entre sustentação e força gravitacional é perdido, assim perde-se a sustentação. O ângulo de ataque, definido entre a corda do perfil e o vento relativo de ar, influencia diretamente as forças aerodinâmicas atuantes, de acordo com a Figura 1.

À medida que o ângulo aumenta, o coeficiente de sustentação (Cl) também cresce até atingir um valor máximo. Após esse ponto, ocorre a perda brusca de sustentação, caracterizando o estol, como mostra

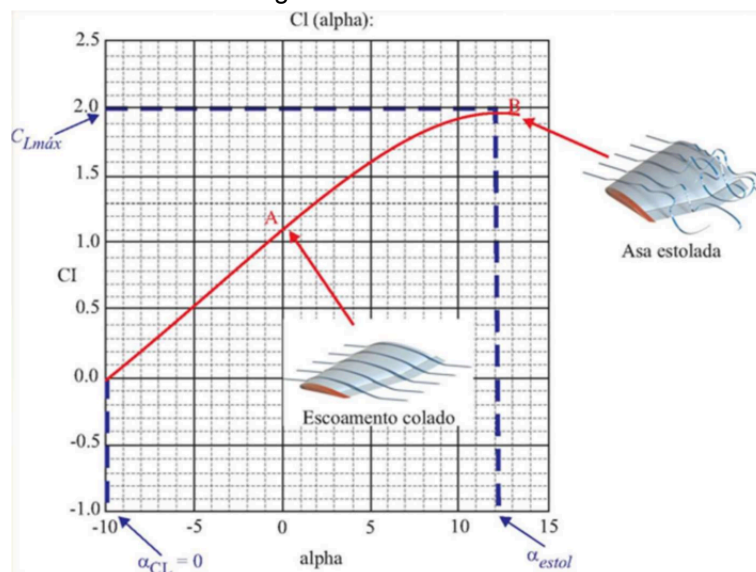
o ponto B da Figura 2. Para isso, utilizou-se o software XFLR5, que permite análises gráficas de perfis e asas em baixos números de Reynolds. Com ele, é possível determinar coeficientes de sustentação, arrasto eficiência aerodinâmica ($\frac{C_l}{C_d}$) e momento de arfagem (C_m) abordado no (RODRIGUES et al., 2023), além do ângulo de ataque máximo antes da estolagem.

Figura 1. Ângulo de ataque do perfil.



Fonte:(RODRIGUES, 2013).

Figura 2. Estol.



Fonte:(CHISTIFANI, 2024)

2. Metodologia e Materiais

Para o presente estudo, foram selecionados três diferentes tipos de perfis aerodinâmicos, sendo eles: S1223, Eppler423, disponíveis em (Airfoil Tools, 2025) e o perfil otimizado, ID3255B. A partir destes, foram feitas análises utilizando o software XFLR5. O objetivo central das análises foi observar as curvas obtidas a partir do gráfico $C_l \times \alpha$ e posteriormente, analisar qual perfil aerodinâmico apresentou os melhores resultados, ou seja, qual perfil obteve o maior ângulo de ataque antes de entrar na fase de estol. Considerando o principal objetivo do estudo, o software XFLR5 permitiu realizar as análises.

Para isso, variou-se o ângulo de ataque no intervalo de -5° a 20° , em intervalos de $0,5$. Também foi calculado pela Equação 1 o número de Reynolds (Re) para cada seção de corda do perfil aerodinâmico (Corda Raiz, Corda Meio e Corda Ponta). Assim, o resultado obtido foi uma média entre as 3 seções de corda, como mostra a Tabela 2, utilizando as constantes de velocidade de cruzeiro, condições do ar na cidade de São José dos Campos apresentada na Tabela 1.

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu} \quad (1)$$

Sendo, densidade do ar (ρ), viscosidade dinâmica do ar (μ), corda do aerofólio (c) e velocidade relativa do vento (V).

Tabela 1 – Constantes.

Dados	$V \left(\frac{m}{s} \right)$	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$\mu \times 10^5 \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$
Corda	11	1,225	1,7894

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Cálculo do Reynolds.w

Parâmetros	Seção Raiz	Seção Meio	Seção Ponta
Corda (m)	0,747	0,580	0,340
Re	511386	397060	232759
Re Médio	380402		

Fonte: Autoria própria.

3. Resultados

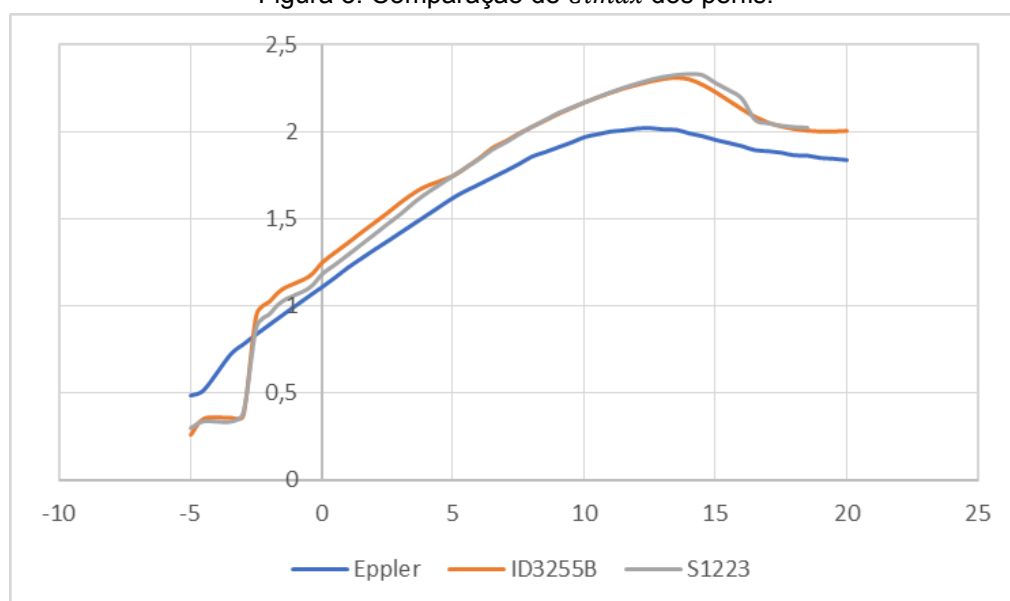
Na Tabela 3 é apresentado os coeficientes de sustentação por ângulo de ataque de cada perfil.

Tabela 3 – Resultados.

α	CI - EPPLER 423	CI - S1223	CI - ID3255B
12	2,0200	2,2769	2,2721
12,5	2,0223	2,2981	2,2909
13	2,0153	2,3153	2,3052
13,5	2,0127	2,3264	2,3124
14	1,9916	2,3314	2,3034
14,5	1,9760	2,3255	2,2719
15	1,9542	2,2986	2,2296

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3 é mostrado o gráfico gerado pelas simulações no XFRL5 de $Cl \times \alpha$.

Figura 3. Comparação de Cl_{max} dos perfis.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os dados calculados a partir do XFLR5, é possível observar na Tabela 3 e Figura 3 que o perfil S1223 com cor azul apresentou o maior ângulo de ataque antes de entrar na fase de estol, tendo um Cl_{max} de 2,3314 para um α de 14° e após isso, teve uma significativa queda de sustentação, configurando o estol. Já o perfil Eppler423 com cor verde teve um estol entre 13° e $13,5^\circ$ e Cl_{max} de aproximadamente 2,0153, e por fim, o perfil ID3255B com cor laranja teve o estol a α de $14,5^\circ$ e Cl_{max} de 2,3255.

4. Conclusões

Este artigo abordou de maneira teórica e experimental os conceitos de estol em diferentes tipos de perfis aerodinâmicos, com o auxílio do software XFLR5, que possibilitou a análise de forma segura e precisa dos valores do coeficiente de sustentação para variados ângulos de ataque, até configurar a fase de estol.

Entender o comportamento dos perfis é fundamental para um projeto aerodinâmico, por isso, o presente trabalho se preocupou em abordar o conceito de estol para três diferentes perfis, obtendo resultados promissores e essenciais para um bom projeto. Sendo o perfil S1223 o mais adequado para utilizar em aeronaves competitivas na SAE, pois busca-se maior fator de carga que está ligado a sustentação maiores e estol mais tardio.

5. Referências Bibliográficas

- [1] SOUZA, Lucas Guimarães e; BORTOLETE, Felipe Araújo; KIELING, Antonio Claudio; TAVARES JUNIOR, Hugo Mario. Metodologia de um projeto aerodinâmico básico voltado à competição SAE Brasil Aerodesign. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA – COBENGE, 44., 2016, Natal. Anais [...]. Natal: UFRN/ABENGE, 2016.
- [2] LUCAS, Cristifani Moraes. Determinação experimental dos coeficientes de arrasto e sustentação do perfil de asa NACA 0018. Porto Alegre: Escola Politécnica – PUCRS, [s.d.]. Trabalho acadêmico.
- [3] DANTAS, Albert Franklin de Moura. Análise aerodinâmica de perfis de asa para veículos aéreos não tripulados usando o software XFLR5. 2014. Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Angicos, Angicos, RN, 2014.
- [4] RODRIGUES, L. E. M. J. *Fundamentos da engenharia aeronáutica*. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013. ISBN 9788522112043.
- [5] AIRFOIL TOOLS. Airfoil Database. [S.l.]: [s.n.], 2025. Disponível em: <http://airfoiltools.com/>. Acesso em: 19 abr. 2025.
- [6] XFLR5. XFLR5. [S.l.]: Techwinder, 2025. Disponível em: <http://www.xflr5.tech/xflr5.htm>. Acesso em: 19 abr. 2025.
- [7] RODRIGUES, Giovanni Vinícius Guimarães; PRUDÊNCIO, Mateus Matheus; CÂMARA, Fernando H. O. Comparação da eficiência aerodinâmica entre perfis simétricos e assimétricos no Aerodesign. Trabalho apresentado na competição SAE Aerodesign, Cornélio Procópio, PR, Brasil, 19 a 21 set. 2023.

Agradecimentos

Agradecemos, em primeiro lugar, à UTFPR – Campus Cornélio Procópio, pelo suporte material e pela estrutura oferecida. À equipe Abutres Aerodesign, pelo apoio constante e pelo incentivo que nos motivam a enfrentar os desafios de projetar e construir uma aeronave. Ao Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço, pela orientação dedicada e pela paciência durante todo o processo.

Responsabilidade pelas Informações

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.