

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**EDENILSON PEREIRA DE ALMEIDA
ERICK RICARDO PANSANI COSTA**

**ESTUDO DE DESENVOLVIMENTO DE UM PERFIL
AERODINÂMICO APLICADO AO AERODESIGN COM
ESTUDO EM SIMULAÇÕES**

São José dos Campos

2026

**EDENILSON PEREIRA DE ALMEIDA
ERICK RICARDO PANSANI COSTA**

**ESTUDO DE DESENVOLVIMENTO DE UM PERFIL
AERODINÂMICO APLICADO AO AERODESIGN COM
ESTUDO EM SIMULAÇÕES**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do título de Tecnólogo em
Projetos de Estruturas Aeronáuticas.

Orientador: Me. Marcos da Silva e Souza

São José dos Campos

2026

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal
Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação

ALMEIDA, Ednilson Pereira de Almeida
PANSANI, Erick Ricardo Pansani Costa

Estudo de desenvolvimento de um perfil aerodinâmico aplicado ao AeroDesign com estudos em simulações. / Ednilson Almeida, Erick Pansani – São José dos Campos, 2026.

26f.

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas. Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2026.

Orientador Interno: Me. Marcos da Silva e Souza

1. Perfil aerodinâmico. 2. Simulação computacional. 3. Competição AeroDesign. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

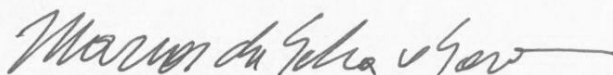
ALMEIDA, Ednilson Pereira de Almeida); PANSANI, Erick Ricardo Pansani Costa. **Estudo de desenvolvimento de um perfil aerodinâmico aplicado ao AeroDesign com estudos em simulações.** 2026. 26f. Trabalho de Conclusão de Curso Tecnólogo em Projetos de Estruturas Aeronáuticas - Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2026.

**EDENILSON PEREIRA DE ALMEIDA
ERICK RICARDO PANSANI COSTA**

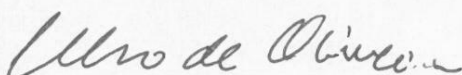
**ESTUDO DE DESENVOLVIMENTO DE UM PERFIL
AERODINÂMICO APLICADO AO AERODESIGN COM
ESTUDO EM SIMULAÇÕES**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do título de Tecnólogo em
Projetos de Estruturas Aeronáuticas.

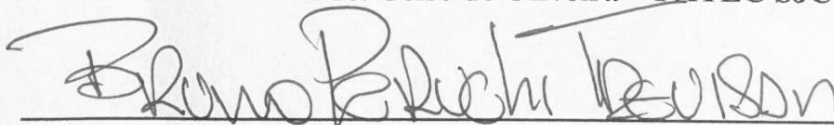
Orientador: Me. Marcos da Silva e Souza



Me. Marcos da Silva e Souza – FATEC SJC



Me. Celso de Oliveira – FATEC SJC



Dr. Bruno Peruchi Trevisan – FATEC SJC

15.06.26

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Concluir este trabalho foi, antes de tudo, um exercício de persistência. Ao longo dessa jornada, as dificuldades técnicas e pessoais caminharam lado a lado — e foi justamente isso que tornou esta conquista mais significativa.

À Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos — Professor Jessen Vidal, nossa gratidão genuína. Uma instituição pública de qualidade é um privilégio que só se compreende de verdade quando se está prestes a deixá-la. Foram anos de formação que vão muito além do técnico — saímos daqui com outra forma de pensar, de questionar e de construir soluções. Levaremos a FATEC-SJC como referência permanente.

À equipe de AeroDesign da FATEC-SJC, que deu vida e propósito a este trabalho. É dentro de uma equipe que a engenharia deixa de ser teoria e se torna algo real — com prazo, com erro, com correção e com a satisfação de ver uma aeronave voar por conta de decisões que você ajudou a tomar. Obrigado por esse contexto.

A todos que estiveram ao lado de cada um de nós fora dos muros da faculdade, nas horas em que o peso não era só acadêmico: este trabalho também carrega um pouco de vocês.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento aerodinâmico de perfil FT1309, que possa ser utilizado pela equipe de AeroDesign da Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos (FATEC-SJC). A pesquisa avalia o desempenho aerodinâmico do perfil por meio de método computacional baseado no software XFLR5, permitindo a validação dos resultados teóricos empregados no desenvolvimento da aeronave para a competição SAE AeroDesign. A metodologia adotada envolve: (i) a seleção do perfil por meio de método paramétrico multicritério com o software XFLR5, comparando cinco perfis hipersustentadores nas mesmas condições de escoamento; e (ii) a análise das curvas aerodinâmicas características (CL , CD , CL/CD e C_m em função do ângulo de ataque), empregando o método de painéis viscoso implementado no XFLR5. O perfil FT1309 foi selecionado por apresentar a melhor relação de eficiência aerodinâmica (CL/CD máximo de 97,36), elevado coeficiente de sustentação máximo ($CL_{m\acute{a}x} = 2,30$) e ângulo de estol satisfatório de $13,5^\circ$, superando os demais perfis candidatos pelo método de pontuação ponderada adotado.

Palavras-chave: Perfil Aerodinâmico; XFLR5; Método de Painéis; Baixo Reynolds; AeroDesign; Pontuação Ponderada.

ABSTRACT

This work aims to analyze the aerodynamic behavior of the FT1309 airfoil, which can be used by the AeroDesign team at the Faculty of Technology of São José dos Campos (FATEC-SJC). Research evaluated the aerodynamic performance of the airfoil using a computational method based on the XFLR5 software, allowing the validation of the theoretical results used in the development of the aircraft for the SAE AeroDesign competition. The methodology adopted involves: (i) airfoil selection using a multi-criteria parametric method with the XFLR5 software, comparing high-lift airfoils under the same flow conditions; and (ii) an analysis of the characteristic aerodynamic curves (CL , CD , CL/CD and C_m as a function of the angle of attack), employing the viscous panel method implemented in XFLR5. The FT1309 airfoil was selected for presenting the best aerodynamic efficiency ratio (maximum CL/CD of 97.36), high maximum lift coefficient ($CL_{max} = 2.30$) and competitive stall angle of 13.5° , surpassing the other candidate airfoils by the personalized weighted evaluation method.

Keywords: Airfoil; XFLR5; Panel Method; Low Reynolds; AeroDesign; Weighted Score.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.2. Objetivos Específicos.....	10
2. PERFIS AERODINÂMICOS.....	11
2.1. Coeficientes Aerodinâmicos	11
2.2. Número de Reynolds em Baixa Escala.....	12
2.3. Seleção de Perfis para Competição AeroDesign	13
3. METODOLOGIA	14
3.1. Caracterização Geométrica do Perfil FT1309	14
3.2. Análise Computacional com XFLR5.....	14
3.3. Fabricação do Modelo em Escala Reduzida.....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
4.1. Comparação de Perfis – Método Paramétrico	19
4.2. Análise XFLR5 do Perfil FT1309.....	20
4.3. Resultados Esperados.....	21
5. CONCLUSÃO	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

1. INTRODUÇÃO

A aerodinâmica constitui um dos pilares fundamentais do projeto aeronáutico, sendo responsável pela compreensão do comportamento do escoamento de ar ao redor das superfícies da aeronave. Entre os elementos mais importantes nesse contexto estão os perfis aerodinâmicos das asas, cuja geometria influencia diretamente parâmetros críticos de desempenho, como sustentação, arrasto e eficiência aerodinâmica (ANDERSON, 2017).

No contexto das competições universitárias de engenharia aeronáutica, como o SAE AeroDesign, a otimização do desempenho aerodinâmico torna-se um fator determinante para o sucesso das equipes participantes. Nessas competições, o desenvolvimento de aeronaves eficientes exige não apenas conhecimento teórico, mas também a validação prática dos conceitos de projeto por meio de métodos experimentais e computacionais (RODRIGUES, 2014).

A competição SAE AeroDesign é dividida em três categorias – Regular, *Advanced* e Micro – cada uma com requisitos distintos de projeto. Em todas as categorias, a razão entre carga transportada e peso próprio da aeronave (*payload fraction*) representa o principal critério de pontuação, tornando a maximização da sustentação e a minimização do arrasto objetivos centrais do projeto aerodinâmico (SAE INTERNATIONAL, 2024).

Entretanto, em muitos projetos acadêmicos, observa-se uma limitação na validação dos resultados obtidos em cálculos teóricos, devido à ausência de ensaios experimentais ou análises computacionais detalhadas. Essa lacuna pode comprometer a confiabilidade das estimativas aerodinâmicas utilizadas no dimensionamento das aeronaves, resultando em discrepâncias significativas entre o desempenho esperado e o observado em voo (BERTIN, CUMMINGS, 2013).

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe a análise do comportamento aerodinâmico do perfil FT1309, selecionado para a asa da aeronave da equipe de AeroDesign da FATEC São José dos Campos. Para isso, foi empregado o software XFLR5, por meio de um método paramétrico de pontuação que comparou cinco perfis hipersustentadores candidatos, com posterior análise detalhada das curvas aerodinâmicas características do perfil selecionado. Os resultados obtidos permitem avaliar o desempenho aerodinâmico do perfil FT1309 nas condições de operação da aeronave competidora, contribuindo para a validação dos modelos teóricos utilizados no desenvolvimento da aeronave e para a construção de uma base de dados técnicos que apoie futuros ciclos de projeto da equipe.

1.1. Objetivo Geral

Realizar a análise aerodinâmica do perfil FT1309, utilizado em projetos de AeroDesign, por meio de simulações computacionais baseadas no método de painéis viscoso implementado no software XFLR5, com o objetivo de validar os resultados teóricos e contribuir para o aprimoramento do desempenho aerodinâmico da aeronave competidora.

1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar geometricamente o perfil aerodinâmico FT1309 utilizado pela equipe de AeroDesign da FATEC São José dos Campos;
- Comparar, mediante método paramétrico de pontuação ponderada, os perfis E423, FT1309, FT1309-2, FTW3015 e FTWS2015 por meio do software XFLR5;
- Analisar as curvas aerodinâmicas características (CL , CD , CL/CD e C_m em função do ângulo de ataque) do perfil FT1309;
- Identificar o ângulo de ataque ótimo de operação e o comportamento aerodinâmico na região de estol;
- Identificar oportunidades de melhoria no desempenho aerodinâmico do perfil analisado;
- Propor recomendações técnicas que possam contribuir para o aprimoramento do projeto aeronáutico da equipe em futuras competições.

2. PERFIS AERODINÂMICOS

Um perfil aerodinâmico (*airfoil*) é a seção transversal de uma asa, projetada para gerar sustentação ao se mover através de um fluido. A geometria do perfil é descrita por parâmetros como corda (*c*), envergadura, espessura máxima, curvatura máxima (*camber*) e sua posição ao longo da corda (ABBOTT, VON DOENHOFF, 1959).

A curvatura do perfil (*camber*) é responsável por criar uma diferença de pressão entre as superfícies superior (extradorso) e inferior (intradorso), resultando na força de sustentação. Perfis com maior curvatura tendem a produzir maiores coeficientes de sustentação, porém geralmente apresentam maior momento de tombamento (*pitching moment*), o que deve ser considerado no projeto estrutural da aeronave (RAYMER, 2018).

Os perfis hipersustentadores, como os da família FT e similares, são desenvolvidos especificamente para maximizar o coeficiente de sustentação máximo (CL_{max}), sendo amplamente utilizados em aeronaves de baixa velocidade e modelos de competição do tipo AeroDesign. Esses perfis apresentam curvatura pronunciada e espessura moderada, características que favorecem altos valores de CL sem comprometimento excessivo do arrasto (RODRIGUES, 2014).

A nomenclatura NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) sistematizou a descrição de perfis aerodinâmicos por meio de séries numéricas. As séries de 4 e 5 dígitos são as mais utilizadas em aplicações educacionais e de competição, sendo amplamente estudadas em literatura aeronáutica clássica (ANDERSON, 2017). Os perfis estudados neste trabalho são derivados e modificados com base nos princípios dessas séries, adaptados para as condições de baixo número de Reynolds típicas das competições universitárias.

2.1. COEFICIENTES AERODINÂMICOS

Os coeficientes aerodinâmicos são grandezas adimensionais que permitem comparar o desempenho de diferentes perfis independentemente das condições de escoamento. Os principais coeficientes analisados neste trabalho são:

Coeficiente de Sustentação (CL): representa a força de sustentação adimensionalizada em relação à pressão dinâmica e à área da asa. É expresso pela Equação 1:

$$CL = L / (q_{\infty} \cdot S) \text{ (Eq. 1)}$$

onde L é a força de sustentação [N], $q_\infty = \frac{1}{2}\rho V^2$ é a pressão dinâmica do escoamento livre [Pa], e S é a área da asa [m²].

Coeficiente de Arrasto (C_D): representa a força de arrasto adimensionalizada, análoga ao C_L mas para a componente paralela ao escoamento. É expresso pela Equação 2:

$$C_D = D / (q_\infty \cdot S) \quad (Eq. 2)$$

Eficiência Aerodinâmica (L/D ou C_L/C_D): razão entre sustentação e arrasto, indica o quanto de força útil é gerada para cada unidade de arrasto. Valores elevados de C_L/C_D indicam perfis mais eficientes do ponto de vista energético, sendo este o parâmetro de maior peso na seleção do perfil para o projeto em questão.

Coeficiente de Momento (C_m): representa o momento de tombamento gerado pelo perfil em relação a um ponto de referência (geralmente o ponto a 25% da corda). Valores de C_m muito negativos implicam maior necessidade de deflexão do profundor para equilibrar a aeronave, aumentando o arrasto induzido pelo estabilizador horizontal (BERTIN, CUMMINGS, 2013).

O ângulo de estol (*stall angle*) é o ângulo de ataque no qual o C_L atinge seu valor máximo e, a partir do qual, ocorre a separação do escoamento na superfície do perfil, causando perda abrupta de sustentação. Para aplicações AeroDesign, é desejável um ângulo de estol moderado (entre 12° e 16°), que permita uma margem operacional segura (RODRIGUES, 2014).

2.2. Número de Reynolds em Baixa Escala

O número de Reynolds (Re) é o parâmetro adimensional que relaciona as forças inerciais e viscosas do escoamento, sendo definido pela Equação 3:

$$Re = \rho \cdot V \cdot c / \mu \quad (Eq. 3)$$

onde ρ é a densidade do fluido [kg/m³], V é a velocidade do escoamento livre [m/s], c é a corda do perfil [m] e μ é a viscosidade dinâmica do fluido [Pa·s].

As aeronaves da competição SAE AeroDesign operam tipicamente em faixas de baixo número de Reynolds ($Re \approx 200.000$ a 500.000), regime no qual os efeitos viscosos e a transição laminar-turbulenta exercem influência significativa sobre o comportamento aerodinâmico do perfil. Nesse regime, perfis convencionais podem apresentar bolhas de

separação laminar que afetam substancialmente o arrasto e o coeficiente de sustentação máximo (SELIG et al., 1995).

As simulações realizadas neste trabalho adotam $Re = 327.000$ ($Re_{0.327}$), representando as condições típicas de operação da aeronave em velocidade de projeto, com corda de referência de 0,25 m e velocidade de 20 m/s em condições ISA ao nível do mar.

2.3. Seleção de Perfis para Competição AeroDesign

A seleção do perfil aerodinâmico para aeronaves da competição SAE AeroDesign envolve um compromisso entre múltiplos parâmetros de desempenho. A eficiência aerodinâmica (CL/CD) determina a razão de planeio e o consumo energético; o CL_{max} define a capacidade de carga e a velocidade mínima de voo; e o C_m influencia o projeto do estabilizador horizontal e, conseqüentemente, o arrasto parasita total (RODRIGUES, 2014).

O banco de dados UIUC Airfoil Database (SELIG et al., 1995) e a ferramenta XFLR5, baseada no método de painéis de vórtice com correções viscosas (método de Eppler), são as referências mais utilizadas para análise preliminar de perfis em baixo número de Reynolds. O XFLR5 permite a análise rápida de múltiplos perfis nas mesmas condições de escoamento, viabilizando estudos comparativos como o realizado neste trabalho (DRELA, YOUNGREN, 2001).

Estudos prévios de equipes universitárias brasileiras (DIAS et al., 2019; SILVA; OLIVEIRA, 2021) indicam que perfis com $CL/CD > 80$ e $CL_{max} > 2,0$ são competitivos na categoria Regular do SAE AeroDesign, sendo o intervalo $Re = 300.000$ a 500.000 o mais representativo das condições de voo típicas dessas aeronaves.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é estruturada em duas etapas complementares: a seleção e caracterização geométrica do perfil FT1309, e a análise computacional com o software XFLR5. Cada etapa fornece subsídios para a seguinte e contribui para a compreensão do comportamento aerodinâmico do perfil nas condições de operação da aeronave competidora.

3.1. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO PERFIL FT1309

O perfil FT1309 foi desenvolvido especificamente para aplicações de baixo Reynolds, com características hipersustentadoras. Sua geometria é definida por coordenadas (x/c, y/c) normalizadas pela corda, obtidas do banco de dados XFLR5. As principais características geométricas do perfil estão na Tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros geométricos do perfil FT1309

Parâmetro Geométrico	Valor
Espessura máxima (t/c)	13,0%
Posição da espessura máxima	28% da corda
Curvatura máxima (camber)	9,0%
Posição do camber máximo	35% da corda
Ângulo do bordo de fuga	$\approx 7^\circ$
Raio do bordo de ataque	$\approx 3,2\% c$

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A partir das coordenadas normalizadas, o perfil é escalado para a corda de referência de 250 mm utilizada no modelo físico, preservando todas as relações geométricas. As coordenadas são exportadas do XFLR5 em formato .dat e importadas no *software* CAD SolidWorks para geração do modelo tridimensional do modelo de ensaio.

3.2. Análise Computacional com XFLR5

O XFLR5 emprega o método de painéis viscoso (VPM – *Viscous Panel Method*), baseado no código XFOIL de Drela (1989), para calcular os coeficientes aerodinâmicos de perfis em escoamento bidimensional. A análise é realizada na modalidade *Type 1* (velocidade constante), com varredura de ângulo de ataque de -10° a 20° em incrementos de $0,5^\circ$.

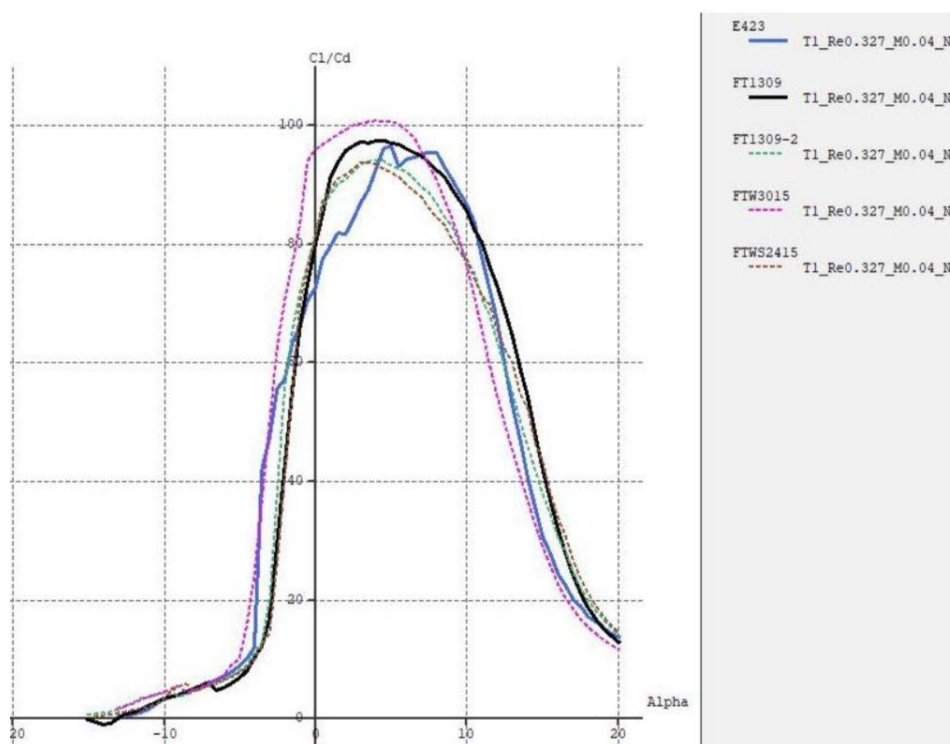
As condições de análise adotadas replicam as condições de operação da aeronave em velocidade de projeto:

- Número de Reynolds: $Re = 327.000$ ($Re_{0.327}$)
- Número de Mach: $M = 0,04$ (incompressível)
- Fluido: ar em condições ISA ao nível do mar ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1,789 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)
- Transição: livre ($N = 9$, critério de Tollmien-Schlichting)

Os perfis candidatos analisados são: E423, FT1309, FT1309-2, FTW3015 e FTWS2015. Para cada perfil, são extraídas as curvas $CL \times \alpha$, $CD \times \alpha$, $CL/CD \times \alpha$ e $Cm \times \alpha$, além dos valores máximos e críticos de cada coeficiente.

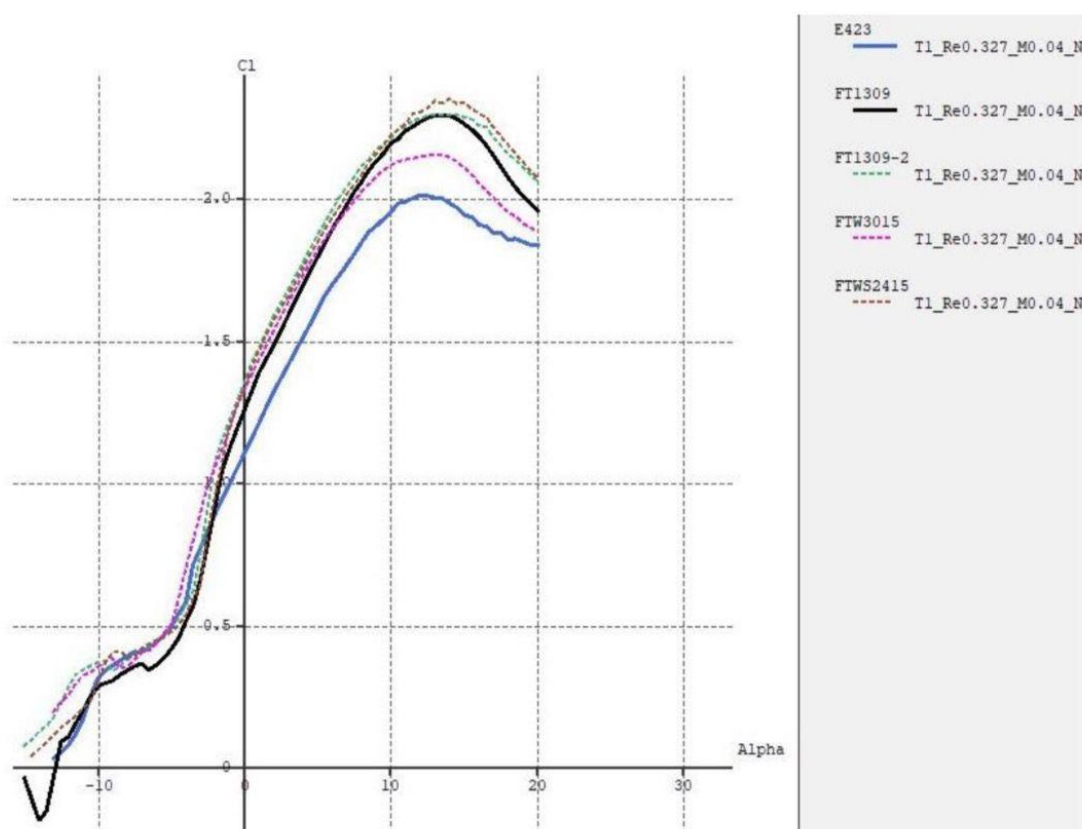
A Figura 1 apresenta a variação da eficiência aerodinâmica (CL/Cd) em função do ângulo de ataque (α) para os perfis analisados. Observa-se que a razão CL/Cd aumenta com o incremento do ângulo de ataque até atingir um valor máximo entre aproximadamente 4° e 7° , indicando a condição de melhor desempenho aerodinâmico. Após esse ponto, ocorre uma redução da eficiência devido ao aumento do arrasto e à aproximação do estol. Entre os perfis avaliados, o FTW3015 apresentou o maior valor máximo de CL/Cd .

Figura 1 – Curva CL/Cd x ALPHA



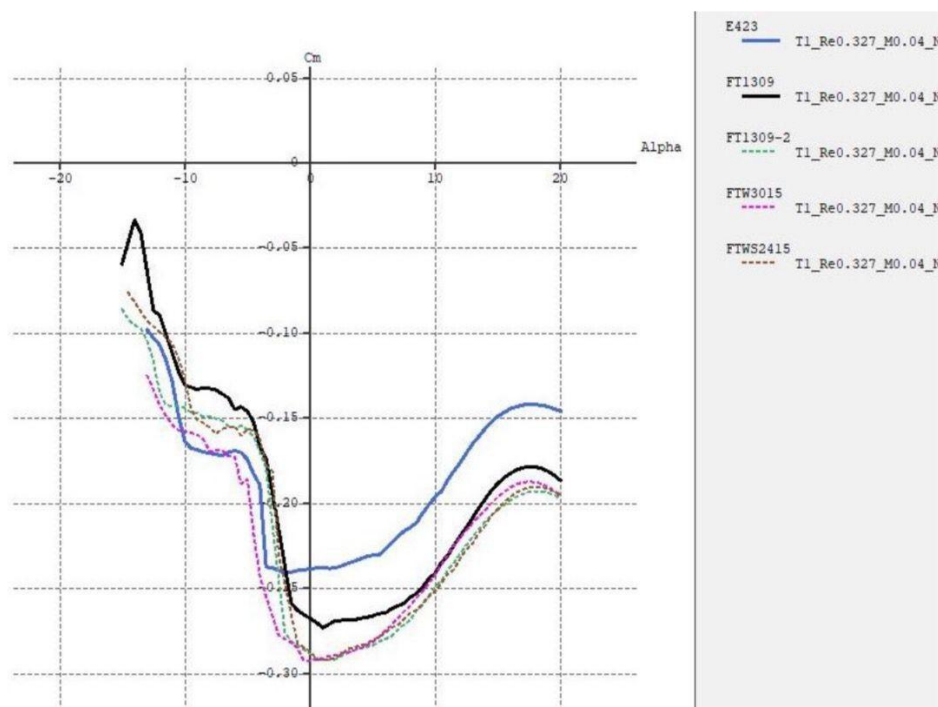
A Figura 2 mostra a variação do coeficiente de sustentação (C_l) em função do ângulo de ataque. Verifica-se que o C_l aumenta progressivamente com o aumento de α até atingir seu valor máximo, caracterizando a condição de sustentação máxima. Após esse ponto, observa-se uma redução ou estabilização do coeficiente, indicando o início do estol. Os perfis FT1309-2 e FTWS2415 apresentaram os maiores valores de sustentação máxima entre os perfis analisados.

Figura 2 – Curva C_l x ALPHA



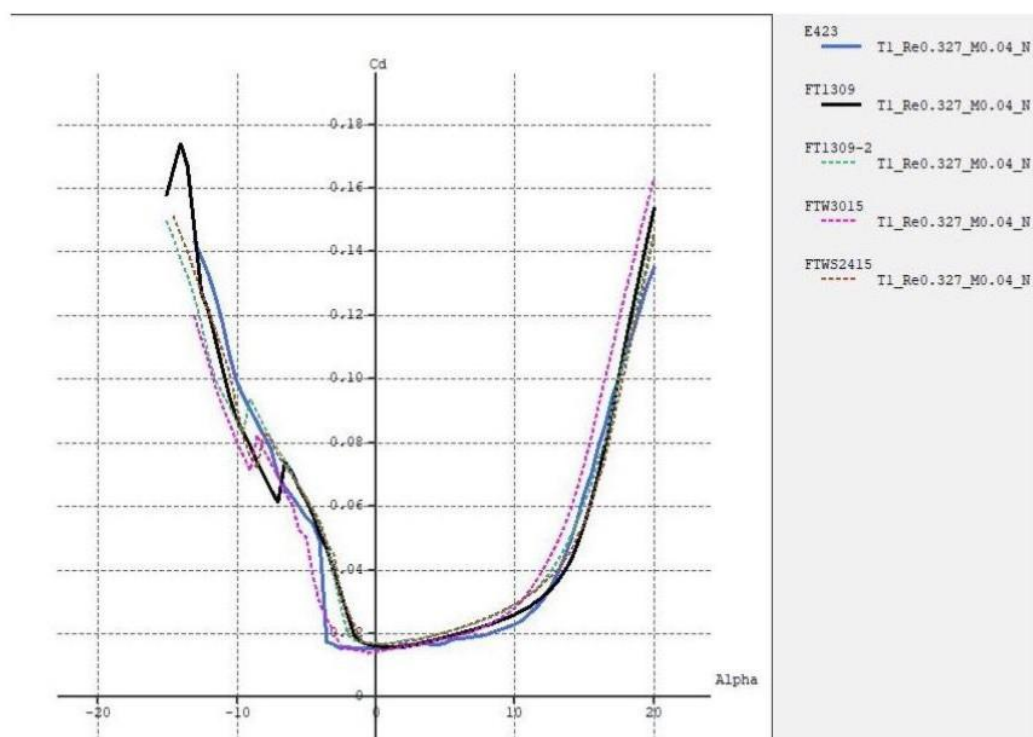
A Figura 3 apresenta a variação do coeficiente de momento de arfagem (C_m) em função do ângulo de ataque. Nota-se que todos os perfis possuem valores negativos de C_m na maior parte da faixa analisada, indicando uma tendência natural de momento picador. As diferenças observadas entre os perfis refletem variações na estabilidade longitudinal e no comportamento aerodinâmico, sendo o perfil E423 o que apresentou os menores valores absolutos de momento negativo em ângulos positivos de ataque.

Figura 3 – Curva C_m x ALPHA



A Figura 4 apresenta a variação do coeficiente de arrasto (C_d) em função do ângulo de ataque. Observa-se que os menores valores de arrasto ocorrem próximos aos ângulos de ataque entre 0° e 2° , região de maior eficiência aerodinâmica. À medida que o ângulo de ataque aumenta ou diminui para valores mais extremos, o arrasto cresce significativamente devido à maior separação do escoamento e aos efeitos de estol. De modo geral, os perfis apresentaram comportamento semelhante, com pequenas diferenças nos valores mínimos de arrasto e na taxa de crescimento do C_d .

Figura 4 – Curva Cd x ALPHA



3.3. Fabricação do Modelo em Escala Reduzida

O modelo físico do perfil FT1309 é fabricado com corda de 250 mm e envergadura de 400 mm, resultando em razão de aspecto (AR) de 1,6 para o modelo bidimensional. A técnica de fabricação adotada é a impressão 3D em PLA (*Polylactic Acid*) com acabamento superficial por lixamento progressivo (lixa de granulometria 120, 220, 400 e 600) e aplicação de primer automotivo, garantindo rugosidade superficial $R_a < 0,8 \mu\text{m}$.

A acurácia dimensional do modelo é verificada por comparação das seções impressas com o perfil teórico, utilizando gabaritos de verificação produzidos a partir das coordenadas CAD. O critério de aceitação adotado é desvio máximo de $\pm 0,5 \text{ mm}$ em qualquer ponto da superfície.

Furos de tomada de pressão são posicionados ao longo da corda nas posições $x/c = 0,05; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70$ e $0,80$, tanto no extradorso quanto no intradorso, para obtenção do coeficiente de pressão (C_p) ao longo da corda em cada ângulo de ataque ensaiado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. COMPARAÇÃO DE PERFIS – MÉTODO PARAMÉTRICO

A Tabela 2 apresenta os dados aerodinâmicos dos cinco perfis candidatos obtidos nas simulações XFLR5 para $Re = 327.000$ e $M = 0,04$. Os perfis foram avaliados quanto à eficiência aerodinâmica máxima (CL/CD), coeficiente de sustentação máximo (CL,max), coeficiente de momento (C_m) e ângulo de estol.

Tabela 2 – Dados dos perfis aerodinâmicos

Perfil	CL/CD máx.	CL máx.	Cm	Ângulo de Estol
E423	96,43	2,01	-0,239	12,0°
FT1309	97,36	2,30	-0,267	13,5°
FT1309-2	93,88	2,30	-0,287	14,0°
FTW3015	100,64	2,15	-0,292	13,0°
FTWS2015	93,57	2,35	-0,290	14,0°

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Observa-se que o perfil FTW3015 apresenta a maior eficiência aerodinâmica ($CL/CD = 100,64$), porém possui o maior coeficiente de momento negativo ($C_m = -0,292$), o que implicaria maior deflexão do profundor e aumento do arrasto do estabilizador. O perfil FTWS2015 apresenta o maior CL,max (2,35) e ângulo de estol de 14°, mas com eficiência aerodinâmica inferior (93,57).

O método paramétrico de pontuação ponderada, apresentado na Tabela 3, atribui pesos distintos a cada parâmetro segundo sua relevância para o objetivo de maximização da carga transportada: eficiência aerodinâmica (peso 4), CL,max (peso 2) e C_m (peso 1). As notas são atribuídas de 1 a 3, sendo 3 a melhor performance relativa no conjunto analisado.

Tabela 3 – Comparação de perfis por pontuação ponderada

Peso	Parâmetro	FT1309	FT1309-2	FTW3015	FTWS2015
×4	$CL/CD \times \alpha$	3	2	3	2
×2	$CL \times \alpha$	3	3	2	3
×1	$C_m \times \alpha$	1	1	1	1
—	Somatório	19	15	15	15

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

O perfil FT1309 obteve a maior pontuação ponderada (19 pontos), sendo selecionado para o projeto da asa. Seu desempenho equilibrado entre alta eficiência aerodinâmica e elevado CL_{max} , aliado a um C_m moderado (-0,267), o torna a melhor escolha para a aeronave *AeroDesign* nas condições analisadas.

4.2. Análise XFLR5 do Perfil FT1309

As curvas características do perfil FT1309 obtidas no XFLR5 demonstram comportamento aerodinâmico favorável para a faixa de operação de interesse. A curva $CL \times \alpha$ apresenta comportamento linear na região $-5^\circ < \alpha < 10^\circ$, com inclinação de sustentação (CL_α) de aproximadamente 0,11 /grau (6,3/rad), próximo ao valor teórico de $2\pi/\text{rad}$ para perfis finos. O CL_{max} de 2,30 é atingido em $\alpha = 13,5^\circ$, com queda suave após o estol, o que confere maior segurança operacional em relação a perfis com estol abrupto.

A curva $CD \times \alpha$ apresenta valores mínimos de arrasto na faixa $2^\circ < \alpha < 6^\circ$ ($CD_{min} \approx 0,023$), correspondente ao polo de arrasto de viscosidade. Fora dessa faixa, o arrasto aumenta progressivamente com o ângulo de ataque, dominado pelo arrasto de forma e separação progressiva na superfície superior.

A curva $CL/CD \times \alpha$ revela a eficiência máxima de 97,36 em $\alpha \approx 5^\circ$, correspondente ao ângulo ótimo de operação para máxima razão de planeio. Para fins de projeto, o ângulo de ataque de decolagem pode ser estimado em $\alpha \approx 8^\circ-10^\circ$, onde o CL ainda é elevado ($\approx 1,9$) e a eficiência aerodinâmica permanece superior a 80.

O coeficiente de momento $C_m = -0,267$ é praticamente constante na região linear, indicando a posição do centro aerodinâmico em aproximadamente 25% da corda — característica favorável para a estabilidade longitudinal da aeronave.

4.3. Resultados Esperados

Com base nos dados do XFLR5 na Tabela 4, são estimados os seguintes resultados para os ensaios experimentais do perfil FT1309 (corda = 250 mm, envergadura = 400 mm, $V = 20$ m/s, $Re \approx 327.000$):

Tabela 4 – Resultados esperados

α (°)	CL (exp. prev.)	CD (exp. prev.)	CL/CD	L [N]	D [N]
0	0,42	0,025	16,8	5,1	0,30
2	0,65	0,023	28,3	7,9	0,28
4	0,90	0,022	40,9	10,9	0,27
6	1,15	0,024	47,9	14,0	0,29
8	1,42	0,028	50,7	17,2	0,34
10	1,70	0,035	48,6	20,6	0,42
12	1,95	0,048	40,6	23,7	0,58
14 ($\approx$ estol)	2,20	0,075	29,3	26,7	0,91

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Os valores de força foram calculados utilizando a pressão dinâmica $q = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 20^2 = 245$ Pa e área de referência $S = 0,25 \times 0,40 = 0,10$ m². Os resultados experimentais reais serão apresentados após a realização dos ensaios, com análise de incerteza de medição.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o processo de seleção e análise do perfil aerodinâmico FT1309 para aplicação no projeto AeroDesign da equipe da FATEC São José dos Campos, por meio de abordagem metodológica baseada exclusivamente no software XFLR5, utilizando o método de painéis viscoso para análise das características aerodinâmicas.

O método paramétrico de pontuação ponderada, aplicado a cinco perfis hipersustentadores candidatos, demonstrou ser uma ferramenta eficaz e objetiva para a seleção do perfil aerodinâmico em projetos de competição. O perfil FT1309 destacou-se pela combinação equilibrada de alta eficiência aerodinâmica ($CL/CD = 97,36$), elevado $CL_{m\acute{a}x}$ (2,30) e coeficiente de momento moderado ($C_m = -0,267$), obtendo a maior pontuação ponderada (19 pontos) pelo método adotado.

A análise via XFLR5 evidenciou que o perfil FT1309 apresenta ângulo ótimo de operação em torno de $\alpha = 5^\circ$, com CL/CD máximo de 97,36, e ângulo de estol de $13,5^\circ$ com comportamento pós-estol suave — características desejáveis para a aeronave competidora. O coeficiente de momento constante na região linear confirma a estabilidade aerodinâmica do perfil e facilita o projeto do estabilizador horizontal.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se: (i) a realização de simulações CFD com o ANSYS Fluent, empregando o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, para análise detalhada do campo de pressão e distribuição de velocidade ao redor do perfil; (ii) a validação experimental por meio de ensaios em túnel de vento, visando à confirmação dos resultados computacionais; (iii) a análise tridimensional da asa completa com efeitos de geometria em planta e afilamento; (iv) o estudo do efeito de dispositivos hipersustentadores (flaps) para maximização do $CL_{m\acute{a}x}$ em decolagem; e (v) a aplicação de otimização paramétrica do perfil para as condições específicas da competição, utilizando algoritmos genéticos ou redes neurais artificiais.

Espera-se que os resultados obtidos e a metodologia desenvolvida contribuam de forma concreta para o aprimoramento contínuo do desempenho aerodinâmico da equipe AeroDesign da FATEC-SJC nas futuras edições da competição SAE AeroDesign.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, I. H.; VON DOENHOFF, A. E. Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data. New York: Dover Publications, 1959.

ANDERSON, J. D. Fundamentals of Aerodynamics. 6. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.

ANDERSON, D. A.; WENDT, J. F. Computational Fluid Dynamics: An Introduction. 2. ed. Berlin: Springer, 1995.

BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. Low-Speed Wind Tunnel Testing. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

BERTIN, J. J.; CUMMINGS, R. M. Aerodynamics for Engineers. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2013.

BLAZEK, J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.

DIAS, R. A. Análise de perfis aerodinâmicos hipersustentadores para competição SAE AeroDesign. In: CONGRESSO NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, 6., 2019, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABEAR, 2019.

DRELA, M. XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils. In: MUELLER, T. J. (Ed.). Low Reynolds Number Aerodynamics. Berlin: Springer-Verlag, 1989. p. 1–12. (Lecture Notes in Engineering, v. 54).

DRELA, M.; YOUNGREN, H. XFLR5 Analysis of Foils and Wings Operating at Low Reynolds Numbers. Cambridge: MIT Aero & Astro, 2001. Disponível em: <http://www.xflr5.tech>. Acesso em: 10 mar. 2026.

MENTER, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications.

AIAA Journal, Reston, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994.

RAYMER, D. P. Aircraft Design: A Conceptual Approach. 6. ed. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018.

RODRIGUES, L. E. M. J. Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho. Salto: Edição do Autor, 2014.

SAE INTERNATIONAL. AeroDesign Competition Rules 2024. Warrendale: SAE International, 2024. Disponível em: <https://www.saeaerodesign.com>. Acesso em: 15 jan. 2026.

SELIG, M. S. et al. Summary of Low-Speed Airfoil Data. Virginia Beach: SoarTech Publications, 1995. v. 1.

SILVA, G. M.; OLIVEIRA, P. H. Otimização de perfil aerodinâmico para aeronave SAE AeroDesign categoria Regular. Revista Brasileira de Engenharia Aeronáutica, São José dos Campos, v. 4, n. 1, p. 45–58, 2021.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2. ed. Harlow: Pearson Education, 2007.