



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ JOABE DE ANDRADE SILVA

**A INFLUÊNCIA DO ARQUEAMENTO DO PERFIL DE AEROFÓLIO NOS
COEFICIENTES AERODINÂMICOS PARA APLICAÇÃO EM AERODESIGN: UMA
ANÁLISE NUMÉRICA**

RUSSAS

2026

JOSÉ JOABE DE ANDRADE SILVA

A INFLUÊNCIA DO ARQUEAMENTO DO PERFIL DE AEROFÓLIO NOS
COEFICIENTES AERODINÂMICOS PARA APLICAÇÃO EM
AERODESIGN: UMA ANÁLISE NUMÉRICA.

Trabalho de conclusão de curso apresentado em formato de artigo apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Campus de Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda.

RUSSAS

2026



A Influência do Arqueamento do Perfil de Aerofólio nos Coeficientes Aerodinâmicos para Aplicação em Aerodesign: Uma Análise Numérica.

The Influence of Airfoil Camber on Aerodynamic Coefficients for Aerodesign Applications: A Numerical Analysis.

La Influencia de la Combadura del Perfil Aerodinámico en los Coeficientes Aerodinámicos para Aplicación en Aerodiseño: Un Análisis Numérico.

José Joabe de Andrade Silva

Bacharelado em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Ceará
Endereço: Russas, Ceará, Brasil
E-mail: joabyandrade@hotmail.com

Edvan Cordeiro de Miranda

Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Ceará
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: edvan@ufc.br

Ramon Rudá Brito Medeiros

Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Endereço: Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: ramon.ruda@ufersa.edu.br

Pedro Helton Magalhães Pinheiro

Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Ceará
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: pedrohilton@ufc.br

Cândido Jorge de Sousa Lobo

Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Ceará
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: candidojslobo@ufc.br

Gutemberg Ferreira Diniz

Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Endereço: Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: gutemberg.ferreira@ufc.br



RESUMO

O presente trabalho busca investigar a influência da variação da geometria de perfis de aerofólio nos principais coeficientes aerodinâmicos, em especial, como a variação do arqueamento de um perfil de aerofólio influencia os coeficientes de sustentação, arrasto e momento, com foco em aplicações no nicho do aerodesign. Por meio de análise numérica computacional, com o uso do método dos painéis, por necessitar de menos capacidade de processamento do computador através do software XFLR-5. Foram simulados perfis derivados do aerofólio NACA 0012, onde os novos perfis ficaram com arqueamentos de 2%, 4%, 6% e 8%, respectivamente, fazendo análise quantitativa e qualitativa dos valores obtidos para ângulo de ataque fixo em 10° . Os resultados mostram que o coeficiente de sustentação aumenta proporcionalmente com o arqueamento, podendo ser modelado por uma fórmula de recorrência baseada na ferramenta estatística carta de controle. Por outro lado, os coeficientes de arrasto e momento também aumentam, mas de forma não linear e sem padrão previsível pela mesma metodologia. O estudo conclui que, o coeficiente de sustentação pode ser modelado matematicamente em função do arqueamento do aerofólio, porém, é indicado estudos complementares mais aprofundados para o coeficiente de arrasto e momento.

Palavras-chave: Coeficientes aerodinâmicos, Aerodesign, Arqueamento, Análise numérica.

ABSTRACT

This study aims to investigate the influence of airfoil profile geometry variation on key aerodynamic coefficients, particularly how the variation of an airfoil's camber affects the lift, drag, and moment coefficients, with a focus on applications in the aerodesign niche. Through computational numerical analysis, using the panel method due to its lower computer processing requirements via the XFLR-5 software. Derived profiles based on the NACA 0012 airfoil were simulated, with the new profiles having cambers of 2%, 4%, 6%, and 8%, respectively, conducting quantitative and qualitative analysis of the obtained values for a fixed angle of attack at 10° . The results show that the lift coefficient increases proportionally with camber and can be modeled by a recurrence formula based on the statistical tool control chart. On the other hand, the drag and moment coefficients also increase, but in a non-linear manner and without a pattern predictable by the same methodology. The study concludes that the lift coefficient can be mathematically modeled as a function of the airfoil's camber; however, further complementary studies are recommended for the drag and moment coefficients.

Keywords: Aerodynamic coefficients, Aerodesign, Camber, Numerical analysis.

RESUMEN

El presente trabajo busca investigar la influencia de la variación de la geometría de los perfiles aerodinámicos en los principales coeficientes aerodinámicos. En especial, cómo la variación de la combadura de un perfil aerodinámico influye en los coeficientes de sustentación, arrastre y momento, con enfoque en aplicaciones en el nicho del aerodiseño. Esto se realizó mediante análisis numérico computacional, utilizando el método de los paneles por requerir menos capacidad de procesamiento, a través del software XFLR-5.



Se simularon perfiles derivados del aeroperfil NACA 0012, donde los nuevos perfiles obtuvieron combaduras de 2%, 4%, 6% y 8%, respectivamente, realizando un análisis cuantitativo y cualitativo de los valores obtenidos para un ángulo de ataque fijo de 10°. Los resultados muestran que el coeficiente de sustentación aumenta proporcionalmente con la combadura, pudiendo ser modelado por una fórmula de recurrencia basada en la herramienta estadística carta de control. Por otro lado, los coeficientes de arrastre y momento también aumentan, pero de forma no lineal y sin un patrón predecible mediante la misma metodología. El estudio concluye que el coeficiente de sustentación puede ser modelado matemáticamente en función de la combadura del perfil, sin embargo, se indican estudios complementarios más profundos para los coeficientes de arrastre y momento.

Palabras-clave: Coeficientes aerodinámicos, Aerodiseño, Combadura, Análisis numérico.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico da mobilidade em suas diversas aplicações traz o desafio de encontrar novos meios que otimizem os modelos propostos (Bathaglini *et al.*, 2025). Essa é a realidade de vários setores, especialmente o aéreo, onde o conhecimento sobre o comportamento do vento (Maia; Neto; Mariano, 2024) que flui ao redor das superfícies de sustentação das aeronaves é de extrema importância para a engenharia de aerodesigns.

Nesse contexto, o estudo dos perfis aerodinâmicos torna-se crucial, pois esses perfis influenciam parâmetros de grande importância em um aerodesign, como a sustentação, o arrasto e o momento gerado em várias superfícies, como por exemplo, nas asas do avião (Zhu *et al.*, 2022).

O desafio, então, é como realizar e validar esse estudo, uma vez que se trata de um escoamento externo, e as leis físicas que governam esses fenômenos são bastante complexas, o que, em muitos casos, dificulta ou inviabiliza a análise de forma analítica (Askan; Tangöz; Konar, 2023). Uma alternativa para aquisição e validação de dados seria a experimentação prática em um túnel de vento (Bai *et al.*, 2023), por exemplo, projetado para reproduzir a situação de maneira similar. No entanto, devido a pequenas variações nos parâmetros de voo, seriam necessárias várias adaptações no modelo, o que tornaria o processo bastante desafiador e financeiramente caro.

Uma outra alternativa para viabilizar o estudo seria a análise por meio de métodos numéricos computacionais (Neto *et al.*, 2017), em que é necessário certo grau de dedicação mental e dispor de um aparato computacional razoável e compatível com o problema em questão (Medeiros; Medeiros; Santos, 2022), pois o tempo gasto é consideravelmente menor do que na resolução de equações e muito menos dispendioso do que o método experimental.

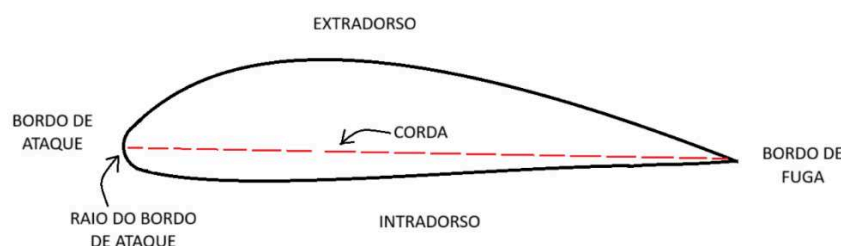
O objetivo do presente trabalho é investigar a influência do parâmetro geométrico do perfil aerodinâmico (aerofólio), por meio de uma análise numérica computacional, para aferir o seu grau de significância no aerofólio de modo a otimiza-lo para aplicação em aerodesigns dos mais diferentes tipos. Em especial, esse artigo trata da influência do arqueamento do perfil nos principais coeficientes aerodinâmicos e seus resultados para aplicações em aerodesign. Além disso, objetiva-se investigar uma correlação recorrente entre o arqueamento e o coeficiente de sustentação no aerofólio analisado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO

2.1 PERFIS AERODINÂMICOS

Em um avião, há várias superfícies que são designadas a gerar sustentação, ou seja, a força necessária para que o avião voe. Nesse sentido, a asa é a principal superfície com essa finalidade, ela consegue esse feito devido a sua seção transversal que tem uma geometria especial, chamada de perfil aerodinâmico, também conhecido como aerofólio (Dias; Anjos; Bonfim, 2023). A figura 1 mostra de maneira esquemática um perfil de aerofólio.

Figura 1. Perfil aerodinâmico



Fonte: Adaptado de Neto, 2017.

Um perfil aerodinâmico (aerofólio), tem alguns parâmetros de projeto que são necessários para sua constituição de forma a condizer com os dados esperados na aplicação dos mesmos (Li *et al.*, 2021). O **Bordo de ataque** é a parte frontal do aerofólio, onde o ar entra em contato primeiro (Wang; Shimada; Farimani, 2021). Tem um formato arredondado para reduzir a resistência ao avanço, equanto o **Raio do bordo de ataque** é a medida do arredondamento do bordo de ataque. Um raio maior pode melhorar a resistência ao estol e a eficiência aerodinâmica (Wang; Shimada; Farimani, 2021).

O **Bordo de fuga** é a parte traseira do aerofólio, onde o fluxo de ar se encontra novamente após passar pelo extradorso e intradorso. É geralmente afilado para minimizar a turbulência (Wang; Shimada; Farimani, 2021); O **Intradorso** é a superfície inferior do aerofólio. Em perfis assimétricos, costuma ter menor curvatura e menor pressão do que o extradorso; O **Extradorso** é a superfície superior do aerofólio. Normalmente tem maior curvatura, acelerando o ar e gerando uma zona de baixa pressão que contribui para a sustentação (Deng; Xue; Qin, 2022).

A **Corda** é a linha reta que liga o bordo de ataque ao bordo de fuga. Define a referência para medir o ângulo de ataque e outras características aerodinâmicas do aerofólio (Deng; Xue; Qin, 2022); A **Espessura** é a distância máxima entre o intradorso e o extradorso do aerofólio, medida perpendicularmente à corda. Influencia a sustentação, a resistência ao arrasto e a estrutura do aerofólio (Deng; Xue; Qin, 2022). Por fim, o **Arqueamento**, também chamado de cambagem, é a curvatura média do aerofólio em relação à corda. Um maior arqueamento geralmente aumenta a sustentação, mas também pode aumentar o arrasto e afetar o ângulo de estol (Deng; Xue; Qin, 2022).

2.2 COEFICIENTES AERODINÂMICOS

A análise do desempenho aerodinâmico de um corpo imerso em um fluido requer a avaliação de parâmetros adimensionais que descrevem suas forças e momentos resultantes (Silveira; Guimarães; Mariano, 2025). Os coeficientes aerodinâmicos mais relevantes são o coeficiente de sustentação, o coeficiente de arrasto e o coeficiente de momento (Wang; Shimada; Farimani, 2021).

2.2.1 Coeficiente de sustentação

O coeficiente de sustentação é uma medida da força aerodinâmica gerada perpendicularmente à direção do escoamento livre (Guimarães; Silveira; Mariano, 2025). Ele é definido como:

$$C_L = \frac{2L}{\rho v^2 S} \quad (1)$$

Onde o C_L é o coeficiente de sustentação, o L significa a força de sustentação, o ρ é tido como a densidade do fluido, o v é a velocidade do escoamento livre e o S é a área de referência (geralmente a corda do aerofólio multiplicada pelo vão no caso de asas).

A força de sustentação gerada por um corpo imerso em um fluido, depende diretamente dentre alguns parâmetros, do formato do aerofólio, do ângulo de ataque e das características do escoamento (Deng; Xue; Qin, 2022).

2.2.2 Coeficiente de arrasto

O coeficiente de arrasto quantifica a resistência aerodinâmica que o corpo oferece ao escoamento (Guimarães; Silveira; Mariano, 2025), ele é dado por:

$$C_D = \frac{2D}{\rho v^2 S} \quad (2)$$

Onde o C_D é o coeficiente de arrasto, o D representa a força de arrasto, o ρ representa a densidade do fluido, o v é a velocidade do escoamento livre e o S é a área de referência (geralmente a corda do aerofólio multiplicada pelo vão no caso de asas).

O arrasto total de um corpo imerso em um fluido é influenciado por diferentes contribuições, como o arrasto de forma, o arrasto de atrito e o arrasto induzido. Reduzir o arrasto é fundamental para otimizar a eficiência aerodinâmica, especialmente em aplicações em aerodesigns, aeronaves e automóveis (Deng; Xue; Qin, 2022).

2.2.3 Coeficiente de momento

O coeficiente de momento descreve a tendência do aerofólio ou corpo aerodinâmico de girar em torno de um ponto de referência, geralmente o aerofólio no seu ponto de referência aerodinâmico (comumente o quarto da corda aerodinâmica) (Deng; Xue; Qin, 2022). Sua expressão é dada por:

$$C_M = \frac{2M}{\rho v^2 S \bar{c}} \quad (3)$$

Onde o C_M é o coeficiente de momento, o M representa o momento que atua na

asa, o ρ representa a densidade do fluido, o v é a velocidade do escoamento livre, o S é a área de referência (geralmente a corda do aerofólio multiplicada pelo vão no caso de asas) e o \bar{c} é a corda média aerodinâmica da asa, em se tratando de um avião.

A análise combinada desses coeficientes permite a caracterização do comportamento aerodinâmico de um aerofólio ou de uma aeronave em diferentes condições operacionais.

2.3 CARTA DE CONTROLE

A Carta de Controle é um dos pilares fundamentais do Controle Estatístico de Processo (CEP) (Sałacinski; Chrzanowski; Chmielewski, 2023), trata-se de uma ferramenta gráfica utilizada para monitorar, controlar e melhorar a estabilidade e a performance de processos ao longo do tempo. Desenvolvidas inicialmente por Walter A. Shewhart na década de 1920, as Cartas de Controle emergiram como a metodologia estatística predominante para esta finalidade, permitindo a distinção objetiva entre um processo em estado de controle estatístico e aquele sujeito a perturbações externas (Montgomery, 2024). A variação é uma característica inerente a qualquer processo, contudo, a capacidade de discriminar entre variação natural e variação anômala é crucial para aferir o controle do processo.

Além de ser considerada uma das principais ferramentas do Controle Estatístico de Processos (CEP), As cartas ou gráficos de controle têm como finalidade identificar desvios nos parâmetros representativos do processo, contribuindo para a redução da quantidade de produtos fora das especificações e, conseqüentemente, para a diminuição dos custos de produção (Kammoun *et al.*, 2023). Sua utilização pressupõe que o processo seja estatisticamente estável, isto é, não haja presença de causas especiais de variação, ou ainda de outra forma, que as sucessivas amostragens representem um conjunto de valores independentes ou não correlacionados (Alencar *et al.*, 2004).

A Carta de controle permite a distinção entre as causas comuns e especiais de variação, ou seja, ela avalia a estabilidade de um processo, apontando se este está ou não sob controle (Camargo *et al.*, 2022). Quando nenhum ponto é plotado para além dos limites de controle, o processo pode ser considerado estável (controlado). Entretanto, quando o processo sofre algum efeito de causas especiais, passa a ficar fora de controle,

de modo a ser explicado por novos valores para a média e para o desvio-padrão (Camargo *et al.*, 2022). Para que um processo seja conceituado como controlado, os limites de variação em relação a sua média não devem mudar mais do que três vezes o desvio-padrão para mais ou para menos (Camargo *et al.*, 2022) como mostra as equações 4 e 5.

$$LS = \bar{X} + 3\sigma \quad (4)$$

$$LI = \bar{X} - 3\sigma \quad (5)$$

Onde LS representa o limite superior da carta de controle, o LI é o limite inferior da carta de controle, o \bar{X} representa o valor da média da amostra e o σ é o valor do desvio-padrão dos valores da amostra estudada.

3 METODOLOGIA

3.1 XFLR-5

O estudo da aerodinâmica é deveras complexo, por exigir do estudioso uma capacidade elevada de compreensão de conceitos abstratos, além de tratar da influência de muitas variáveis. Nesse sentido, o uso de ferramentas computacionais como o XFLR-5, torna-se cada vez mais fundamental para dá suporte aos estudos (Ahmad *et al.*, 2021).

O software XFLR-5 é uma ferramenta gratuita que já atingiu um patamar de confiança de vários projetistas de aerodesigns (Guimarães; Silveira; Mariano, 2025), principalmente no que se refere à comperição SAE-Brasil Aerodesign. Este programa é bem versátil e acessível, podendo qualquer pessoa usar para estudos tendo de apenar uma ferramenta de informática simples (computador ou notebook) e algum conhecimento na área de aerodinâmica. De acordo com Guimares (2025), XFLR5 é um software de código aberto, desenvolvido em C++ por André Deperrois. Este software é utilizado para obter resultados aerodinâmicos em estudos numéricos de aerofólios, asas e aeronaves, com foco em escoamentos laminares.

O XFLR-5 surgiu como uma extensão do programa XFOIL, criado por Mark Drela e Harold Youngren no Massachusetts Institute of Technology (MIT), em meados de 1980, para estudos de escoamentos subsônicos ao redor de perfis aerodinâmicos (Guimarães; Silveira; Mariano, 2025). Inicialmente, o XFOIL foi escrito em uma outra linguagem computacional (FORTRAN), e mais tarde adaptado para C++ no XFLR-5,

ampliando suas capacidades de processamento, para incluir análises bidimensionais e tridimensionais. Dentre as metodologias de análise do XFLR-5, uma das principais aplicadas para análises bidimensionais é o Método dos Painéis (*Panel Method*), uma técnica amplamente utilizada em aerodinâmica devido à sua simplicidade e baixo custo computacional, especialmente em comparação com métodos como a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) (Guimarães; Silveira; Mariano, 2025).

3.2 MÉTODO DOS PAINÉIS

O método dos painéis pertence à classe dos métodos de singularidades, onde o corpo imerso no escoamento é modelado por uma distribuição de singularidades (fontes, vórtices, dupletes) ao longo do seu contorno (Gunel; Koç; Yavuz, 2016). A formulação mais comum para perfis 2D é o método dos painéis de vórtice com distribuição linear de intensidade (Gunel; Koç; Yavuz, 2016). Esse foi o tipo de análise usada no presente estudo.

Considera-se um escoamento potencial, incompressível e irrotacional em torno de um perfil arbitrário. Pelo teorema de Kutta-Joukowski, a sustentação é gerada pela circulação em torno do perfil (Nielsen; Gilpin, 2023). O perfil é discretizado em N segmentos retos (painéis), cada um contendo um ponto de controle (Nielsen; Gilpin, 2023).

Em cada painel, é colocada uma distribuição de vórtice de intensidade. A velocidade induzida em qualquer ponto do espaço por um elemento de vórtice é dada pela Lei de Biot-Savart (Lee *et al.*, 2023). A velocidade total em um ponto de controle é a soma vetorial da velocidade da corrente livre e das velocidades induzidas por todos os painéis (Nielsen; Gilpin, 2023).

O coeficiente de sustentação para o perfil é calculado integrando-se a distribuição de pressão (força normal) e projetando-a na direção perpendicular à corrente livre (Lee *et al.*, 2023). O Coeficiente de Arrasto resulta da integração da componente da força de pressão paralela à corrente livre (Tang *et al.*, 2024). É importante notar que, na teoria potencial invíscida, o arrasto de atrito é zero (Paradoxo de D'Alembert) (Qi; Wang; Jiang, 2022). Para estimativas preliminares, o XFLR5 aplica métodos semi-empíricos, como a teoria de camada limite de Michel, para calcular o arrasto de atrito e somá-lo ao arrasto

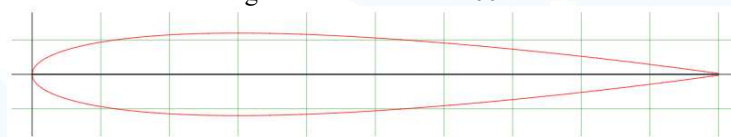
calculado anteriormente, fornecendo um arrasto total (Nielsen; Gilpin, 2023).

O coeficiente de Momento é obtido pela integração do momento das forças de pressão em relação a um ponto de referência, geralmente o quarto de corda (Nielsen; Gilpin, 2023). Baseado nessa teoria que embasa a ferramenta computacional, o XFLR-5 torna-se um meio significativamente útil para análise dos coeficientes aerodinâmicos (Ahmad *et al.*, 2021).

3.3 ESCOLHA DO PERFIL

A primeira etapa consistiu na busca de um perfil aerodinâmico adequado no site airfoiltools.com. O objetivo então, era selecionar um aerofólio simétrico, ou seja, sem arqueamento (ou cambagem), para servir como base para a análise. Após a escolha do perfil, sua geometria foi salva para posterior modificação, permitindo a introdução de diferentes graus de arqueamento conforme estabelecido para o estudo (Ruiz; Renzulli; D'ambrosio, 2023). A figura 2 mostra o perfil escolhido, trata-se de um NACA 4 dígitos (NACA 0012), onde sua máxima espessura é de 12% da corda e seu arqueamento é zero (perfil simétrico) (Penchev; Panayotov, 2025).

Figura 2. Perfil NACA 0012



Fonte: airfoiltools.com

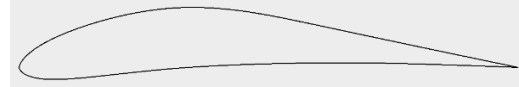
Inicialmente, foi realizada uma análise preliminar utilizando o software XFLR-5, no qual foram simuladas as condições aerodinâmicas dos modelos, analisando os perfis derivados do aerofólio NACA 0012 (figura 2), onde foi variado o arqueamento, de modo que houvesse uma razão aritmética constante (Wan, 2024). Ao final, foram obtidos quatro novos aerofólios com arqueamentos de 2%, 4%, 6% e 8% (Adeyi; Alabi; Towoju, 2024), que são arqueamentos comuns para aplicações de alta sustentação para voo subsônico (Ruiz; Renzulli; D'ambrosio, 2023). As figuras 3, 4, 5 e 6, mostram os perfis derivados do NACA 0012 com o arqueamento modificado.

Figura 3. Perfil 2% de arqueamento



Fonte: Autoria própria

Figura 5. Perfil 6% de arqueamento



Fonte: Autoria própria

Figura 4. Perfil 4% de arqueamento



Fonte: Autoria própria

Figura 6. Perfil 8% de arqueamento



Fonte: Autoria própria

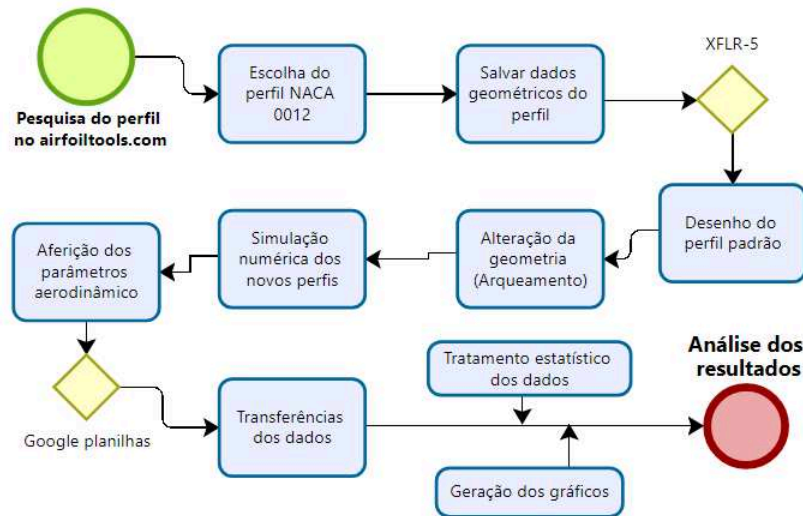
A etapa seguinte é definir os parâmetros de análise, como o ângulo de ataque (fixado em 10°), número de Reynolds (500.000) e número de Mach (0.05 equivalente a 17m/s) (Guimarães; Silveira; Mariano, 2025). Para um valor de Reynolds positivo, o módulo de análise de camada limite é ativado (Nielsen; Gilpin, 2023). Em seguida, o núcleo *solver* do XFLR5 monta e resolve o sistema linear para o método dos painéis, calculando a distribuição de vórtices e de pressão para o perfil (Gunel; Koç; Yavuz, 2016).

Para um valor de Reynolds finito, o *solver* acopla os resultados invíscidos (vórtices e pressão) a um código de análise de camada limite integral (Farrell *et al.*, 2025). Este módulo calcula o desenvolvimento da camada limite, o ponto de transição laminarturbulento e os parâmetros de espessura, deslocamento e momento, culminando no cálculo do coeficiente de arrasto de atrito (Lee *et al.*, 2023). Por fim, o software apresenta graficamente os resultados, incluindo as curvas $C_L \times \alpha$, $C_D \times \alpha$, $C_M \times \alpha$ entre outros.

Após a coleta dos dados no XFLR-5, estes foram exportados e transferidos para a ferramenta *online google planilhas*, onde foram submetidos a uma avaliação e organização adequadas. No *Google Planilhas*, foram aplicadas técnicas de filtragem e processamento dos dados, além da construção de gráficos e tabelas para melhor visualização e interpretação dos resultados. Essa etapa foi essencial para a identificação de tendências e possíveis inconsistências nos dados obtidos na simulação inicial.

A figura 7 mostra de forma visual o fluxograma da metodologia aplicada no presente estudo.

Figura 7. Fluxograma do estudo.



Fonte: Autoria própria.

Para uma melhor compreensão, os resultados estão organizados de modo que, primeiramente, são mostrados os resultados dos coeficientes de sustentação, arrasto e momento, gerados no XFLR-5 e tratados no *google planilhas*. Em seguida, é explorado, por meio de um teste estatístico, uma investigação das relações entre o arqueamento e os coeficientes aerodinâmicos. Por fim, é proposta uma equação de recorrência que relaciona o coeficiente de sustentação com o arqueamento de um perfil no intervalo de arqueamento estudado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO

Como esperado (Alsahlani; Mohammed; Al-Mosallam, 2023), o coeficiente de sustentação aumenta com o aumento do arqueamento. Na tabela 1 é possível notar o valor do coeficiente de sustentação para cada valor de arqueamento analisado. Vale resaltar que esses valores foram encontrados fixando o ângulo de ataque em 10° .

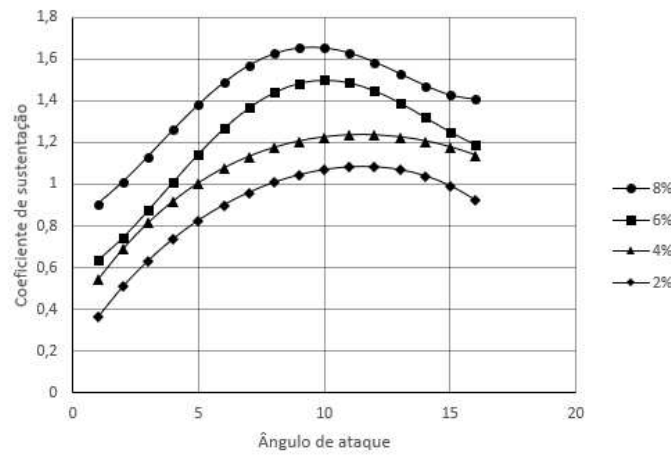
Tabela 1. Coeficiente de sustentação para cada arqueamento, considerando fixo o ângulo de ataque de 10° .

ARQUEAMENTO DO PERFIL	COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO
2%	1,0675
4%	1,2250
6%	1,4990
8%	1,6529

Fonte: Autoria própria.

A seguir, está exposto na figura 8 o gráfico do comportamento do coeficiente de sustentação pelo ângulo de ataque. Cada curva do gráfico equivale a um dos perfis investigados e seus respectivos valores de arqueamento.

Figura 8. Gráfico $C_L \times \alpha$



Fonte: Autoria própria.

4.2 COEFICIENTE DE ARRASTO

Assim como o coeficiente de sustentação, o coeficiente de arrasto também aumenta com o aumento do arqueamento (Lima; Bergold, 2025). A tabela 2 mostra o aumento do coeficiente de arrasto com o aumento do arqueamento, considerando um ângulo de ataque fixo de 10°.

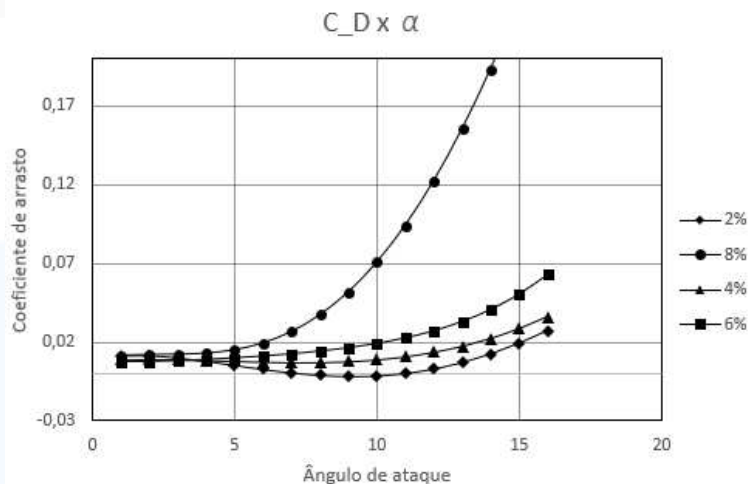
Tabela 2. Coeficiente de arrasto para cada arqueamento, considerando fixo o ângulo de ataque de 10°.

ARQUEAMENTO DO PERFIL	COEFICIENTE DE ARRASTO
2%	-0,0013
4%	0,0090
6%	0,0190
8%	0,0707

Fonte: Autoria própria.

Além disso, é possível notar que o coeficiente de arrasto é cada vez maior com o aumento do arqueamento. A figura 9 expõe as curvas de coeficiente de arrasto para cada perfil e arqueamento estudado, e seus comportamentos com a variação do ângulo de ataque.

Figura 9. Gráfico $C_D \times \alpha$



Fonte: Autoria própria.

4.3 COEFICIENTE DE MOMENTO

O coeficiente de momento tem suas particularidades (Camargo *et al.*, 2022). Nesse caso, o coeficiente de momento resulta em valores cada vez mais negativos. A tabela 3 mostra os valores de coeficiente de momento para cada arqueamento estudado, considerando um valor fixado do ângulo de ataque em 10°.

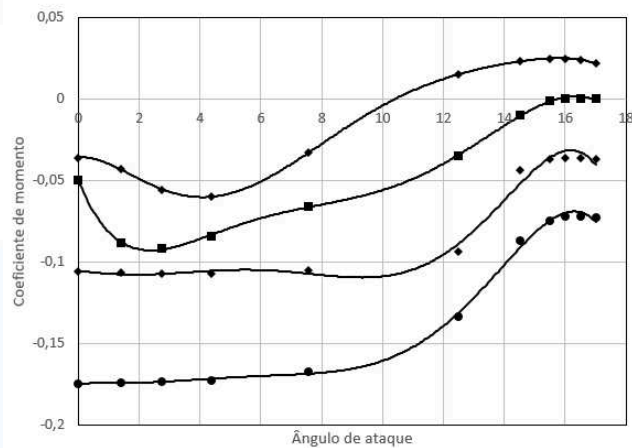
Tabela 3. Coeficiente de momento para cada arqueamento, considerando fixo o ângulo de ataque de 10°.

ARQUEAMENTO DO PERFIL	COEFICIENTE DE MOMENTO
2%	-0,0001
4%	-0,0598
6%	-0,1210
8%	-0,1638

Fonte: Autoria própria.

Além disso, é possível notar que o coeficiente de momento preserva o seu comportamento oscilatório, porém, as oscilações ocorrem em valores cada vez mais negativos, o resultado devido ao aumento do arqueamento é notável. Contudo, a amplitude de oscilação tem variação estatisticamente pouco significativa. A figura 10 mostra as curvas de coeficiente de momento para cada perfil e arqueamento estudado, e seus comportamentos com a variação do ângulo de ataque. Vale resaltar que esse gráfico, juntamente com as figuras dos gráficos $C_L \times \alpha$ e $C_D \times \alpha$ estão baseados nas linhas de tendências polinomiais de sexto grau, traçadas na ferramenta *online google sheets*.

Figura 10. Gráfico $C_M \times \alpha$



Fonte: Autoria própria

4.4 TESTE ESTATÍSTICO

Baseando-se nos resultados dos coeficientes aerodinâmicos, é possível analisar estatisticamente cada caso, para investigar alguma correlação intrínseca, que relacione de maneira estatisticamente confiável as variáveis estudadas.

A análise dos resultados da variação do coeficiente de sustentação em função do aumento do arqueamento demonstra um crescimento proporcional dos valores, variando entre 2% e 8%, como mostra a tabela 4.

Tabela 4. Coeficiente de sustentação e razão de crescimento para cada arqueamento, com ângulo de ataque de 10°.

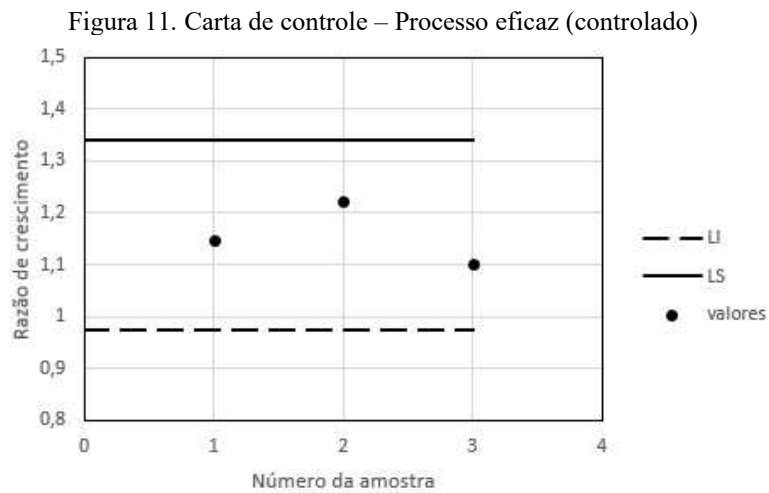
ARQUEAMENTO DO PERFIL	COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO	RAZÃO
2%	1,0675	
4%	1,2250	1,1475
6%	1,4990	1,2237
8%	1,6529	1,1027
MÉDIA		1,1580
DESVIO-PADRÃO		0,0612

Fonte: Autoria própria.

O valor da média mostrado na tabela 4, foi obtido pelo cálculo da média das razões de crescimento entre os coeficientes de sustentação. a mesma metodologia foi adotada para se chegar no valor do desvio-padrão exposto na mesma tabela 4.

A figura 11 mostra na forma de uma carta de controle o "Processo Eficaz" (ou Processo Capaz), onde os pontos indicam os valores da razão de crescimento do coeficiente de sustentação, as linhas horizontais são os limites superior (LS) e inferior

(LI) baseados nas equações 4 e 5, evidenciando a uniformidade da razão de aumento do coeficiente de sustentação, quando se aumenta o arqueamento.



Fonte: Autoria própria.

Uma maneira matemática de descrever essa recorrência, isto é, uma maneira de prevê o aumento no coeficiente de sustentação pelo aumento do arqueamento, é através da equação 6, que é válida no intervalo do arqueamento de um perfil de 2% a 8%.

$$C_{L_{2n}} = C_{L_2} \cdot 1,1580^{n-1}; C_{L_2} = 1,0625; n = \{1, 2, 3, 4\} \quad (6)$$

Vale resaltar que essa equação é válida apenas para o coeficiente de sustentação. Os coeficientes de arrasto e momento tiveram as respostas evidenciadas nas tabelas 5 e 6, de acordo com a mesma análise.

Tabela 5. Coeficiente de arrasto e razão de crescimento para cada arqueamento, com ângulo de ataque de 10°.

ARQUEAMENTO DO PERFIL	COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO	RAZÃO
2%	-0,0013	
4%	-0,0090	-6,9230
6%	0,0190	2,1111
8%	0,0707	3,7210
MÉDIA		-0,3636
DESVIO-PADRÃO		5,7373

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6. Coeficiente de momento e razão de crescimento para cada arqueamento, com ângulo de ataque de 10°.

ARQUEAMENTO DO PERFIL	COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO	RAZÃO
2%	1,0675	
4%	1,2250	598,0000

6%	1,4990	2,0234
8%	1,6529	1,3537
MÉDIA		200,4590
DESVIO-PADRÃO		344,2807

Fonte: Autoria própria.

Observe que, tanto os valores dos coeficientes de arrasto, quanto os valores dos coeficientes de mometo, têm respostas abruptas, isto é, retorna variáveis bastante dispersas, o que pode vir a causar erros de precisão, no caso de buscar-se modelar matematicamente esses coeficientes de maneira similar ao que foi feito com o coeficiente de sustentação. Desse modo, é indicado que se faça estudos posteriores para investigar de maneira mais aprofundada a influência do arqueamento nos coeficientes de arrasto e momento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do presente estudo é possível concluir que os coeficientes aerodinâmicos sofrem influência direta do arqueamento do perfil do aerofólio. Primeiramente, é possível notar que o coeficiente de sustentação tem resposta, aproximadamente proporcional, no que concerne o aumento de seu valor, com o aumento do arqueamento de 2% à 8%.

O coeficiente de arrasto tem seu valor aumentado também, como resposta ao aumento do arqueamento do perfil. No entanto, diferentemente do que ocorre com o coeficiente de sustentação, a resposta do coeficiente de arrasto é bem mais dispersa, principalmente no intervalo de 6% a 8%, onde há um crescimento acentuado no coeficiente de arrasto, que foi evidenciado através dos resultados.

No que diz respeito ao coeficiente de momento, este tem sua resposta bastante singular ao se aumentar o arqueamento do perfil. De início, é possível notar que seu comportamento de característica oscilatória é conservado, porém, o coeficiente de momento médio (dado pela média aritmética do valor extremo superior com o valor extremo inferior) atinge valores cada vez mais negativos. Esse tipo de comportamento tem implicações em outros setores, como por exemplo, em se tratando de um perfil de asa de um aerodesign, geraria a necessidade de elaborar outros tipos de estudos, para minimizar a instabilidade gerada por esse momento médio negativo.

Portanto, o estudo mostra que há influência direta do arqueamento de um perfil de aerofólio nos coeficientes aerodinâmicos do mesmo. Nota-se que o coeficiente de sustentação tem resposta que pode ser modelada matematicamente, essa modelagem é respaldada através de análise estatística. Contudo, as respostas dos coeficientes de arrasto e de momento são estatisticamente inviáveis de serem modeladas utilizando a mesma análise, devido a dispersão dos valores. O estudo mostra a investigação de uma fórmula de recorrência para prevê o valor do coeficiente de sustentação com o aumento do arqueamento do perfil no intervalo de 2% à 8%, e indica a necessidade de estudos posteriores, para descrever as respostas dos coeficientes de arrasto e de momento.

REFERÊNCIAS

- ADEYI, T. A.; ALABI, O. O.; TOWOJU, O. A. Influence of airfoil geometry on vtol uav aerodynamics at low reynolds numbers. **Archives of Advanced Engineering Science**, p. 1–13, 2024.
- AHMAD, M. et al. Estimation of stability parameters for wide body aircraft using computational techniques. **Applied Sciences**, 2021.
- ALENCAR, J. R. B. et al. Uso de controle estatístico de processo (cep) para validação de processo de glibenclamida comprimidos. **Revista Brasileira de Farmácia**, v. 85, n. 3, p. 115–119, 2004.
- ALSAHLANI, A. A.; MOHAMMED, A.-S.; AL-MOSALLAM, M. A study of impacts of airfoil geometry on the aerodynamic performance at low reynolds number. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, v. 12, n. 2, p. 99–106, 2023.
- ASKAN, A.; TANGÖZ, S.; KONAR, M. An investigation of aerodynamic behaviours and aerodynamic performance of a model wing formed from different profiles. **The Aeronautical Journal**, Cambridge University Press, v. 127, n. 1310, p. 676–697, 2023.
- BAI, J. et al. Interactive effects of wind tunnel sidewalls on flow structures around 2d airfoil model. **Journal of Thermal Science**, v. 32, p. 708–717, 2023.
- BATHAGLINI, M. G. et al. Implantando um sistema integrado de gestão no processo de aquisição e controle de bens móveis na universidade federal de santa maria. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 4, p. e9527–e9527, 2025.
- CAMARGO, B. B. de et al. Estudo comparativo entre a aplicação da média móvel e carta de controle da média móvel exponencialmente ponderada para monitoramento de pandemias. **Revista Produção Online**, v. 22, n. 3, p. 3127–3161, 2022.



DENG, F.; XUE, C.; QIN, N. Parameterizing airfoil shape using aerodynamic performance parameters. **AIAA Journal**, 2022.

DIAS, F. S.; ANJOS, L. S.; BONFIM, Í. S. Controlador rotacional de aerofólio construído com materiais de baixo custo com potencial de aplicação na geração de energia elétrica. **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, v. 10, n. 2, 2023.

FARRELL, D. T. et al. Programmable surface dimpling of textile metamaterials for aerodynamic control. **Advanced Materials**, Wiley Online Library, p. 2505817, 2025.

GUIMARÃES, G. H. M.; SILVEIRA, A. I. S.; MARIANO, F. P. Análise aerodinâmica de aerofólios usando o xflr5: Uma abordagem educacional para competições aerodesign. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 11, n. 1, p. 112–131, 2025.

GUNEL, O.; KOÇ, E.; YAVUZ, T. Comparison of cfd and xfoil airfoil analyses for low reynolds number. **International Journal of Energy Applications and Technologies**, Ilker ÖRS, v. 3, n. 2, p. 83–86, 2016.

KAMMOUN, M. A. et al. Joint production, maintenance and quality control chart optimization for a degrading manufacturing–reworking system with assignable causes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 130, p. 1241–1264, 2023.

LEE, C. et al. Super-resolution of time-resolved three-dimensional density fields of the b mode in an underexpanded screeching jet. **Physics of Fluids**, AIP Publishing, v. 35, n. 6, 2023.

LI, J. chao et al. Low-reynolds-number airfoil design optimization using deep-learning-based tailored airfoil modes. **Aerospace Science and Technology**, 2021.

LIMA, L. G. d.; BERGOLD, A. W. d. B. A física de um desastre aéreo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 47, p. e20240388, 2025.

MAIA, C. S. de A.; NETO, M. G. F.; MARIANO, F. P. Análise da camada limite a partir de experimento em túnel de vento utilizando placa plana de camada limite para estimativa de potencial eólico. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 16, n. 1, p. 2566–2585, 2024.

MEDEIROS, M. J. de; MEDEIROS, J. M. de; SANTOS, C. A. C. dos. Soluções híbridas na determinação da espessura da camada limite hidrodinâmica e térmica de maneira acoplada. **Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, 2022.

MONTGOMERY, D. C. The 100th anniversary of the control chart. **Journal of Quality Technology**, v. 56, p. 2 – 4, 2024.

NETO, J. d. S. B. et al. Análise numérica de um perfil aerodinâmico utilizando a plataforma openfoam. **Revista Tecnologia**, v. 38, n. 2, 2017.



NIELSEN, B.; GILPIN, M. Xfoil performance validation for medium-scale variable pitch uav rotor systems. **R&D Journal**, Ownership of copyright in terms of the Work remains with the Authors, v. 39, p. 12–22, 2023.

PENCHEV, S.; PANAYOTOV, H. A wind tunnel study of the aerodynamic characteristics of wings with arc-shaped wingtips. **Engineering Proceedings**, MDPI, v. 100, n. 1, p. 28, 2025.

QI, H.; WANG, P.; JIANG, L. Numerical investigation on aerodynamic performance and interaction of a lift-offset coaxial rotor in forward flight. **International Journal of Aeronautical and Space Sciences**, Springer, v. 23, n. 2, p. 255–264, 2022.

RUIZ, M. C.; RENZULLI, L.; D'AMBROSIO, D. Airfoil optimization for rotors operating in the ultra-low reynolds number regime. **Physics of Fluids**, 2023.

SALAĆINSKI, T.; CHRZANOWSKI, J.; CHMIELEWSKI, T. Statistical process control using control charts with variable parameters. **Processes**, 2023.

SILVEIRA, A. I. S.; GUIMARÃES, G. H. M.; MARIANO, F. P. Análise computacional da influência do escoamento sobre a asa no estabilizador horizontal. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 11, n. 1, p. 307–326, 2025.

TANG, S. et al. A comparative study on wind profiles and surface aerodynamic parameters of typhoons over coastland and coastal sea. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 129, n. 13, p. e2023JD040449, 2024.

WAN, S. The influence of wing geometry changes on aircraft gliding. **Highlights in Science, Engineering and Technology**, v. 119, p. 792–800, 12 2024.

WANG, Y.; SHIMADA, K.; FARIMANI, A. Airfoil gan: Encoding and synthesizing airfoils for aerodynamic-aware shape optimization. **ArXiv**, abs/2101.04757, 2021.

ZHU, Z. et al. Aerodynamic characteristics of co-flow jet wing with simple high-lift devices. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2022.