Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas
Artigos

A APLICAÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS EM DIFERENTES TIPOS DE AEROFÓLIOS DE AERONAVES

Gabriel de Lima Bohus[1]
Jorge Melquiades Costa da Silva Filho[2]
Carlos Eduardo Martins[3]
Bruno César de Andrade Silva[4]

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é analisar o comportamento do fluxo aerodinâmico com a variação do número de Reynolds e compreender a aplicação do número de Reynolds no dimensionamento de aerofólios aeronáuticos. A metodologia do trabalho tem como classificação qualitativa, na qual a abordagem possibilitou compreender os conceitos envolvidos com o número de Reynolds, através de uma pesquisa bibliográfica, a pesquisa foi caracterizada como descritiva, com o objetivo de relatar características, analisando e comparando dados sobre aerofólios. Os resultados obtidos apresentaram que a aplicação do número de Reynolds é fundamental para o dimensionamento dos aerofólios, no entanto cada número de Reynolds possui uma eficiência maior de acordo com o objetivo de cada aerofólio, sendo importante analisar se ele será usado em altas ou baixas velocidades, se deve ou não possuir sustentação por exemplo.

Palavras-chave: Número de Reynolds; aeronaves; aerofólio.

[1]Acadêmico do Curso de Ciências Aeronáuticas pela Faculdade de Tecnologia AeroTD. E-mail: bohuslima@outlook.com
[2]Acadêmico do Curso de Ciências Aeronáuticas pela Faculdade de Tecnologia AeroTD. E-mail: jorgemelquiades7@gmail.com
[3] Licenciado em Física e Mestre em Educação, UFSC/SC. Professor (AEROTD). E-mail: carlos.martins@professores.aerotd.edu.br
[4] Engenheiro Mecânico e Mestre em Tecnologia de Materiais, CEFET/RJ. Professor (AEROTD). E-mail: bruno.bcas@gmail.com

APPLICATION OF REYNOLDS NUMBER IN DIFFERENT TYPES OF AIRCRAFT AIRFOLLS

ABSTRACT

The objective of the present work is to analyze the behavior of the aerodynamic flow with the variation of the Reynolds number and understand the application of the Reynolds number in the design of aeronautical airfoils. The methodology of the work has a qualitative classification, in which the approach made it possible to understand the concepts involved with the Reynolds number. Through bibliographical research, the research was characterized as descriptive, with the objective of reporting characteristics, analyzing and comparing data on airfoils. The results obtained showed that the application of the Reynolds number is fundamental for the sizing of airfoils, however each Reynolds number has greater efficiency according to the objective of each airfoil, and it is important to analyze whether it will be used at high or low speeds, whether it should have support, for example.

Key words: *Reynolds number; aircraft; airfoil*

1 INTRODUÇÃO

O número de Reynolds é empregado no projeto de aerofólios, com o intuito de melhorar o desempenho, reduzindo assim o arrasto aéreo e aumentando a eficiência da aeronave estando estreitamente ligado ao conceito de camada limite. De acordo com Brunetti (2008), a análise de fluxos que se formam ao longo de uma superfície sólida possibilita minimizar o arrasto das asas de aeronaves no âmbito da aviação, portanto, a relação entre as forças inerciais e viscosas está associada ao número de Reynolds, sendo um parâmetro que possibilita prever o fluxo do escoamento de um fluido, definindo se será laminar ou turbilhonado e permite a caracterização da dinâmica dos fluidos ao redor de objetos sólidos.

Isto contribui para o projeto de aeronaves mais eficientes em termos de arrasto e sustentação, permitindo que o *design* das asas e os controles de voo sejam otimizados para diferentes condições de voo. Além disso, segundo Fox (2018), o número de Reynolds é usado para determinar a eficácia das técnicas de controle de fluxo e sistemas aerodinâmicos, por exemplo*, flaps* e *slats* nas asas

podem ser ajustados para modificar o fluxo e melhorar o desempenho da aeronave durante as fases de pouso e decolagem. Assim, gerou-se a seguinte problemática: como o número de Reynolds pode influenciar no dimensionamento dos aerofólios de aeronaves?

Este trabalho busca analisar a aplicação do número de Reynolds na concepção e dimensionamento de aerofólios aeronáuticos, investigando seu impacto no comportamento do fluxo aerodinâmico. Entender o número de Reynolds demonstra a sua importância à medida que a partir da sua compreensão é possível prever fenômenos como o estol e pode estimular inovações tecnológicas, como *winglets* e revestimentos avançados, sendo assim, os resultados deste projeto visam contribuir para a literatura científica, fornecendo dados e análises que servirão de base para futuras pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Gradualmente ao longo dos anos os projetos de aeronaves evoluíram em busca de maior eficiência e confiabilidade, quando uma nova aeronave é apresentada ao mercado, há uma série de fatores que determinam se a sua demanda será alta ou baixa. Os projetistas aeronáuticos devem considerar alguns aspectos como economia de combustível e eficiência aerodinâmica sem negligenciar a segurança, portanto, o estudo da variação do número de Reynolds é um dos tópicos analisados para o dimensionamento de aerofólios de aeronaves que atendam às suas expectativas de projeto (Rodrigues, 2014).

2.1 NÚMERO DE REYNOLDS

No ano de 1880 foi idealizado através de um trabalho experimental por Osborne Reynolds o número adimensional que ficou denominado de número de Reynolds (Re), sendo ele parâmetro-chave para definição do regime de escoamento, esse número é um parâmetro adimensional utilizado na aerodinâmica no projeto e dimensionamento de aerofólios, ele determina o comportamento do

ar em torno de uma superfície, influenciando diretamente o desempenho da aeronave em termos de sustentação, resistência aerodinâmica e eficiência de voo (SILVEIRA, 2023). A medida resulta do equilíbrio entre as forças inerciais e viscosas do ar, é expressa pela equação 1:

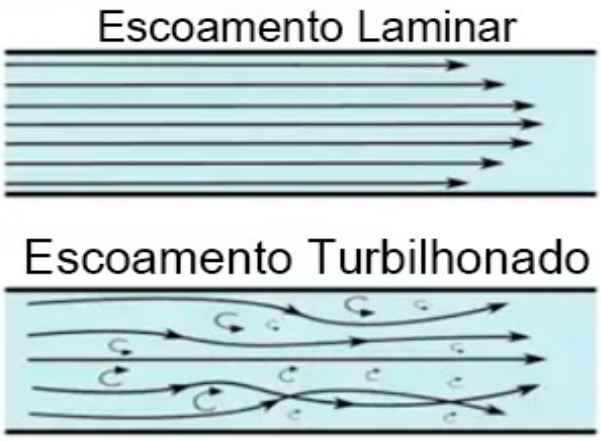
$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

Na equação 1 (ρ) significa densidade do ar, (v) velocidade do fluxo de ar, (L) dimensão característica do aerofólio, geralmente a corda, (μ) viscosidade do ar. A combinação da corda com o perfil NACA (*National Advisory Comitte for Aeronautics*) específico define a forma, comprimento, espessura e curvatura do aerofólio (Anderson Jr, 2016). Essa análise revela o tipo de fluxo de ar predominante sobre o aerofólio – laminar, turbulento ou em transição – que afeta diretamente a eficiência aerodinâmica. Consequentemente, o design do aerofólio deve ser adaptado para diferentes velocidades e tamanhos de aeronave (Silveira, 2023).

Os números de Reynolds são definidos em: Baixos Números de Reynolds e Altos Números de Reynolds, cada um com suas próprias características e propriedades em relação às suas aplicações no âmbito aeronáutico. Nos baixos números de Reynolds, como acontece com aeronaves de pequeno porte, drones, planadores e até mesmo em condições de baixa velocidade, o fluxo de ar sobre o aerofólio tende a ser laminar. O fluxo laminar é caracterizado por linhas de corrente que se deslocam paralelas, suaves e ordenadas, resultando em um menor arrasto de superfície (Fox, 2018). Isso se traduz em maior eficiência aerodinâmica para essas aeronaves, pois o arrasto de superfície, que surge da fricção do ar na superfície do aerofólio, é reduzido, facilitando o movimento com menor resistência. Anderson Jr (2016) proporciona uma base sobre como os diferentes regimes de fluxo influenciam na resistência do ar e a sustentação.

Figura 1 – Número de Reynolds

RBAC&CIA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697



Fonte: Adaptado *Thermal nuclear power* (2019).

A Figura 1 ilustra o movimento do ar sobre o aerofólio, com fluxo laminar ou turbilhonado. Em baixos números de Reynolds, a camada limite é espessa e com menor energia, tornando-se mais suscetível à separação em ângulos de ataque elevados, o que aumenta o arrasto e reduz a sustentação, prejudicando o desempenho do voo (Fox, 2018). Aeronaves de baixa velocidade devem priorizar aerofólios que favoreçam o fluxo laminar e evitem a separação, com curvaturas e ângulos que previnem instabilidades e estol (Silveira, 2023).

Na aviação, as forças viscosas são cruciais para o escoamento do ar sobre as superfícies das aeronaves. A viscosidade afeta a camada de ar em contato direto com a superfície, formando a camada limite (Fox, 2018). Dependendo da atuação dessas forças, o fluxo pode ser laminar (suave) ou turbulento (desorganizado), impactando a eficiência do voo (Sadraey, 2017).

2.2 ESCOAMENTO LAMINAR E TURBILHONADO

O escoamento de fluido pode ser laminar ou turbilhonado. No regime laminar, o fluido move-se suavemente e de forma ordenada, caracterizando-se por baixa velocidade e sem turbulência. Já no escoamento turbilhonado, as partículas

RBAC&CIA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

se movem de maneira aleatória, criando vórtices e correntes, sendo típico de altas velocidades e turbulência (Fox, 2018). A Figura 1 ilustra esses dois tipos de escoamento.

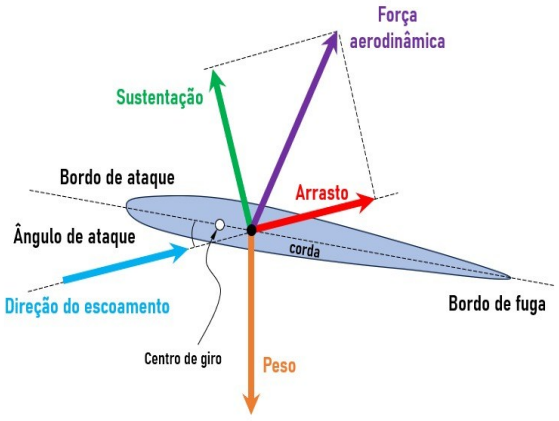
2.3 AEROFÓLIO

Superfícies aerodinâmicas e aerofólios estão inter-relacionados, mas são conceitos distintos: o aerofólio é a forma teórica da asa, determinando sustentação e arrasto, enquanto as superfícies aerodinâmicas incluem partes da aeronave que interagem com o ar para gerar forças como sustentação, arrasto e controle, como estabilizadores, superfícies de controle e fuselagem (Silveira, 2023). O número NACA, criado por um comitê do governo dos EUA, descreve a forma e o desempenho dos aerofólios, sendo essencial no design de aeronaves (Anderson, 2016).

Os números NACA são expressos por quatro ou mais dígitos. Nos números de quatro dígitos, os dois primeiros indicam a curvatura máxima do perfil (em porcentagem da corda), e os dois últimos, a posição dessa curvatura. Nos de cinco dígitos, o primeiro número representa a espessura máxima, os dois seguintes indicam a posição da curvatura e os dois últimos detalham a curvatura (Nasa, 2017). A Figura 2 mostra um aerofólio típico e as forças atuantes.

RBAC&CIA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

Figura 2 – Representação de um aerofólio e suas características



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

O ângulo de ataque, mostrado na Figura 2, é crucial na avaliação de aerofólios, sendo formado entre a direção do vento relativo e a linha da corda do perfil aerodinâmico. Segundo Silveira (2023), ao aumentar o ângulo, a sustentação cresce até um valor máximo, após o qual diminui, gerando o estol, e o arrasto também aumenta. A sustentação é a diferença de pressão entre as superfícies superior e inferior da asa, e o coeficiente de sustentação, dependente do ângulo de ataque, espessura e curvatura do aerofólio, é um valor experimental (Sadraey, 2017).

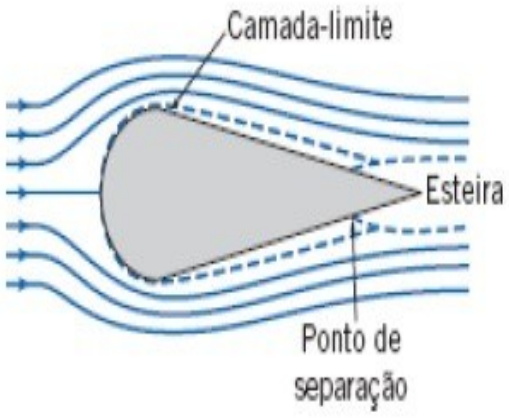
O arrasto se caracteriza pelo turbilhonamento formado atrás dos objetos, quando eles se deslocam através do ar, o arrasto não é causado pela turbulência e sim pela redução de pressão atrás dos objetos, sendo assim os filetes de ar não conseguem acompanhar a área da superfície, já o coeficiente de arrasto é um número adimensional utilizado para quantificar o arrasto ou resistência de um objeto (Silveira, 2023).

2.3.1 CAMADA LIMITE

RBAC&CiA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

Conforme Fox (2018) a camada limite é a região de transição entre a superfície de um aerofólio e o fluxo do fluido ao seu redor, onde a velocidade muda significativamente em virtude da viscosidade do fluido. O escoamento externo permite compreender que o fluxo é considerado invíscido, ou seja, a viscosidade do fluido não tem efeito significativo no fluxo. A figura 3 representa a camada limite.

Figura 3 – Camada limite



Fonte: Fox (2018, p.65).

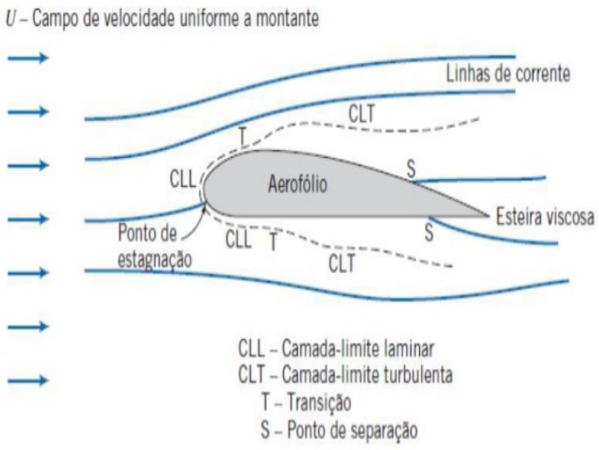
O descolamento da camada limite ocorre quando o fluxo de ar se desprende da superfície, gerando turbilhonamento e aumentando o arrasto aerodinâmico (Fox, 2018). Em aeronaves, essa camada de ar, ligada à viscosidade do fluido, adere à superfície da asa devido ao atrito. Porém, em condições como ângulos de ataque altos ou altas velocidades, o fluxo pode perder aderência à superfície da asa, se separar e formar uma região turbulenta conhecida como descolamento.

Em um escoamento sobre um aerofólio, a corrente livre se separa ao contornar o corpo a partir do ponto de estagnação. Segundo Fox (2018), o fluido próximo às superfícies do perfil ganha velocidade devido à condição de não deslizamento, gerando camadas limite que, inicialmente laminares, tornam-se turbulentas com a distância.

A transição de laminar para turbulento depende de fatores como as condições do fluxo livre, a rugosidade das superfícies e o gradiente de pressão, sem um valor exato de número de Reynolds para essa mudança

RBAC&CiA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

Figura 4 – descolamento da camada limite



Fonte: Fox (2018, p. 521).

Um gradiente de pressão adverso pode causar a separação do escoamento, levando à formação de uma esteira viscosa, como mostrado na Figura 4, o que resulta em baixa eficiência para a aeronave (Fox, 2018).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a sistematização desta pesquisa, adotamos como procedimentos metodológicos o método qualitativo, no qual efetuamos uma revisão bibliográfica seguida de uma análise de conteúdo.

3.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A abordagem se deu através de pesquisas bibliográficas com a análise qualitativa de dados obtidos em livros, artigos e trabalhos científicos. Silveira, Flôr e Machado (2011, p. 37) descrevem a pesquisa qualitativa como:

> A pesquisa qualitativa contempla as descrições detalhadas de fenômenos, comportamentos; citações diretas de pessoas sobre suas experiências; trechos de documentos, registros, correspondências; gravações ou transcrições de entrevistas e discursos; dados com maior riqueza de detalhes e profundidade; associada a dados qualitativos, abordagem interpretativa e não experimental, análise de caso ou conteúdo (Silveira, Flôr e Machado 2011, p. 37).

RBAC&CiA
Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

A pesquisa foi caracterizada como descritiva, com o objetivo de relatar características, analisar e comparar dados sobre aerofólios, camada limite e número de Reynolds (Barbosa, 2023). Utilizamos o estado do conhecimento proposto por Romanowski e Ens (2006) e da análise de conteúdo com base em Franco (2021).

Por optarmos em pesquisar apenas trabalhos científicos, o estudo apresentado é denominado de estado do conhecimento, por "abordar apenas um setor das publicações sobre o tema estudado" (Romanowski e Ens, p. 39-40, 2006). Esse tipo de pesquisa se diferencia da classificada como estado da arte, pois:

> Os estudos realizados a partir de uma sistematização de dados, denominada "estado da arte", recebem esta denominação quando abrangem toda uma área do conhecimento, nos diferentes aspectos que geraram produções. Por exemplo: para realizar um "estado da arte" sobre "Formação de Professores no Brasil" não basta apenas estudar os resumos de dissertações e teses, são necessários estudos sobre as produções em congressos na área, estudos sobre as publicações em periódicos da área (ROMANOWSKI e ENS, p. 39-40, 2006).

Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

O procedimento de pesquisa foi efetuado seguindo os três momentos orientados por Guesser e Hobold (2024): 1° definição do(s) descritor(es); 2° coleta, armazenamento e organização dos trabalhos por categorias; 3° análise dos trabalhos. Para este último, efetuamos a leitura de todos os textos na íntegra, na qual resultou a seleção daqueles que analisavam números entre $>10^4$ e $< 10^5$, com diferença na espessura do aerofólio e da corda, "em função da busca a uma resposta específica do investigador" (Franco, 2021, p. 64).

3.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Os dados para este estudo foram selecionados a partir da análise de trabalhos publicados nos últimos 10 anos (2015-2024), assegurando a relevância e atualidade das informações analisadas. A seleção priorizou as pesquisas que

tratassem de números de Reynolds associados a dois diferentes tipos de aerofólios no que tange suas numerações NACA.

No primeiro momento, realizamos o levantamento das pesquisas correlatas por meio de uma busca sistemática em três sítios acadêmicos: SciELO, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e o Catálogo de Teses & Dissertações da CAPES. Utilizaram-se três diferentes combinações de descritores: "Reynolds + aerodinâmica", "Reynolds + aeronaves" e "Reynolds + aerofólio".

No segundo momento, as buscas possibilitaram a coleta de 5 trabalhos, sendo uma tese, três artigos e um trabalho de conclusão de curso, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Pesquisas encontradas

Título	Autores	Tipo	Ano/publi
Simulação computacional de um perfil aerodinâmico em escoamentos de baixo número de Reynolds utilizando métodos numéricos distintos.	Silveira, Emanuel Pereira.	Trabalho de Conclusão de Curso	2023
Basic Understanding of aerofoil characteristics at low Reynolds numbers.	Justin Winslow, Hikaru Otsuka, Bharath Govindarajan e Inderjit Chopra	Artigo	2018
Effect of Reynolds number on the aerodynamic performace of NACA0012 Aerofoil.	Shailesh Jha, Uddipta Gautam, S Naraynan, LA Kumaraswami Dhas	Artigo	2018
Analysis of the influence of Reynolds number and maximum thickness on an aerodynamic profile.	Gabriel Fontes Iasbeck, C. Basilio, Edson Henrique Heiderich, S. Hanriot	Artigo	2017
The Airfoil Thickness Effects on Wavy Leading-Edge Phenomena at Low Reynolds Number Regime.	Adson Agríco de Paula.	Tese	2016

Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

RBAC&CIA Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas ISSN 2763-7697

Este quadro engloba os trabalhos encontrados que discutem tanto aerofólios de números NACA 0009 como NACA 0012, facilitando a comparação e análise dos resultados em relação ao fluxo aerodinâmico em torno dos aerofólios. Após a coleta, armazenamento e armazenamento dos trabalhos acessados, realizamos a pré-análise por meio da leitura “flutuante”, com a intencionalidade de “estabelecer contatos com os documentos a serem analisados e conhecer os textos e as mensagens neles contidas” (Franco, 2021, p.54).

Dessa forma, realizamos o terceiro momento, procedendo a análise das publicações coletadas e selecionadas que procuram discutir os números NACA 0009 e NACA 0012. A operacionalização da análise ocorreu a partir da divisão dos trabalhos classificados em cada categoria, sempre na tentativa de encontrar elementos que demonstrem a aplicabilidade desses números. A pesquisa bibliográfica também possibilitou encontrar conceitos relacionados ao número de Reynolds, além de outros referenciais teóricos utilizados para fundamentar esta pesquisa.

RBAC&CIA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

NACA 0009 é um perfil aerodinâmico simétrico, com 9% de espessura máxima em relação à corda e sem curvatura, utilizado principalmente em estabilizadores e em superfícies onde é necessário um perfil simétrico que não gere sustentação em ângulo zero, o primeiro "0" indica que o perfil não possui curvatura. Perfis simétricos não geram sustentação em repouso ou com ângulo de ataque nulo, o segundo número '0' também indica que não há deslocamento máximo da curvatura (o ponto de máxima espessura é simétrico em relação ao eixo longitudinal do perfil), o terceiro e o quarto números “09” representam a espessura máxima do perfil em porcentagem da corda (que é a linha que vai da borda de ataque à borda de fuga do aerofólio), nesse caso, o número "09" indica que a espessura máxima é de 9% da corda do perfil (Winslow *et al.*, 2018).

O NACA 0012 é um perfil aerodinâmico simétrico, com espessura máxima de 12% da corda e sem curvatura, o que significa que ele não gera sustentação em ângulo de ataque zero, esse tipo de perfil é ideal para superfícies de controle e estabilizadores, pois sua simetria oferece uma resposta neutra, tornando-o eficiente e estável para manobras e controle em aeronaves, sendo um perfil simétrico, onde o primeiro "0" indica que não há curvatura, assim como o NACA 0009, como o perfil é simétrico, ele não gera sustentação em ângulo de ataque zero, o segundo "0" também indica que não há deslocamento máximo da curvatura, mantendo a simetria no perfil, os últimos dois números “12” representam a espessura máxima em porcentagem da corda, neste caso, a espessura é de 12% da corda (Jha, S., 2018).

4.1 EXPERIMENTOS COM AEROFÓLIO DE NÚMERO NACA 0009

O aerofólio NACA 0009 é um perfil simétrico que apresenta 9% de espessura máxima em relação à sua corda e não possui curvatura, sendo especialmente utilizado em superfícies como estabilizadores e em aplicações onde não é necessária sustentação em ângulo zero de ataque (Winslow et al., 2018). A escolha de perfis simétricos como o NACA 0009, conforme destacado por Anderson (2016), é fundamental em projetos que exigem estabilidade e controle sem a geração significativa de sustentação em ângulo nulo. A ausência de curvatura, evidenciada pelo primeiro "0" e pela simetria da espessura do perfil, confere a esse aerofólio um desempenho previsível, que facilita a análise de sua interação com o fluxo de ar (Silveira, 2023).

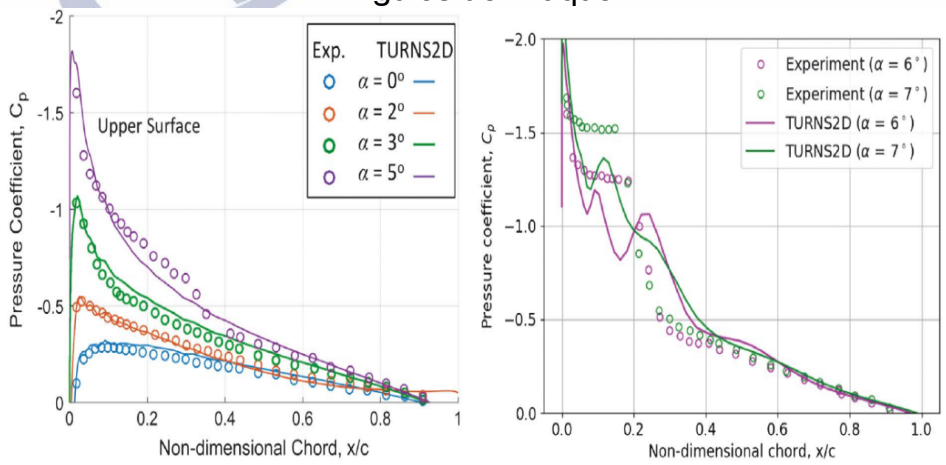
Além disso, a precisão nas dimensões, como a espessura de 9% da corda, é um reflexo da sistematização proporcionada pelos números NACA, sendo essencial no entendimento do comportamento aerodinâmico e no planejamento experimental com esse tipo de perfil (NASA, 2017). Esses fatores tornam o NACA 0009 um bom candidato para experimentos que buscam compreender melhor os efeitos do fluxo sobre perfis simétricos e seu comportamento em diferentes condições de operação.

RBAC&CiA Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas ISSN 2763-7697

Segundo (Winslow *et al*., 2018) os gráficos da Figura 5a e 5b mostram a distribuição de pressão na superfície superior de um aerofólio NACA0009 em diferentes ângulos de ataque com um número de Reynolds de 5×10^4, nos gráficos os círculos representam os dados experimentais, enquanto as linhas sólidas mostram as previsões numéricas.

Para esta análise, uma das ferramentas utilizadas foi o TURNS2D, uma ferramenta de simulação numérica que efetua a análise do comportamento de escoamentos aerodinâmicos em torno de aerofólios, ela é especialmente útil para estudar a separação de fluxo, reanexação e formação de vórtices, fatores que impactam diretamente a sustentação e o arrasto de superfícies aerodinâmicas, como asas de aeronaves, em diferentes números de Reynolds (Winslow *et al.*, 2018).

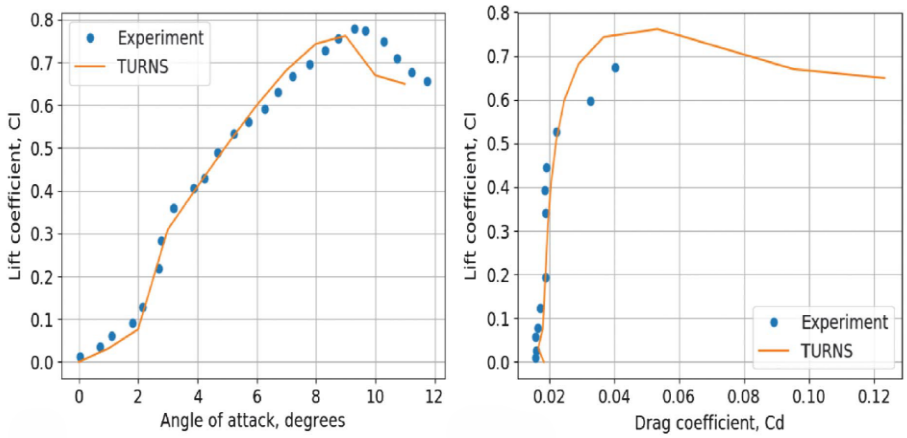
Figura 5 - (A) NACA0009: Baixos Ângulos de Ataque; (B) NACA0009: Altos Ângulos de Ataque



Fonte: Winslow *et al.,* (2018, p. 3).

Para ângulos de ataque baixos ($\alpha \leq 5°$), as previsões do TURNS2D mostram boa concordância com os dados experimentais. Em ângulos maiores, embora a correspondência diminua, o modelo ainda reproduz a tendência geral observada. Em baixos números de Reynolds ($Re = 5 \times 10^4$), ocorre separação do fluxo na superfície superior do aerofólio, com esse fenômeno sendo parcialmente capturado pelas previsões do modelo (Winslow *et al.*, 2018).

Figura 6 - (A) Sustentação; (B) Arrasto



Fonte: Winslow *et al.,* (2018, p. 4).

A análise do aerofólio NACA 0009 mostra que as previsões do TURNS2D correspondem aos dados experimentais até o estol. Em 6° de ângulo de ataque e Re = 50.000, os contornos de Mach e linhas de corrente indicam separação e reanexação do fluxo na superfície superior, com transição de laminar para turbulento, enquanto a superfície inferior permanece laminar. Diferenças na distribuição de pressão entre os dados experimentais e numéricos podem influenciar os resultados (Winslow *et al.*, 2018).

As figuras 6a e 6b comparam as curvas de sustentação e arrasto, respectivamente, para o aerofólio NACA 0009 em um número de Reynolds de 5 × 10^4 entre os experimentos e as previsões do CFD (Computational Fluid Dynamics) em diferentes ângulos de ataque. Observa-se que as previsões de sustentação e arrasto pelo TURNS2D correspondem bem aos resultados experimentais até próximo ao estol. O comportamento não linear da sustentação é bem capturado pelo TURNS2D. Perto das condições de estol, o modelo SA e o modelo de transição podem ter limitações devido às grandes regiões de separação do fluxo. Sabe-se que o modelo de turbulência SA dentro do RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) tende a superestimar a viscosidade turbulenta, o que leva a altas taxas de dissipação no fluxo. Para prever melhor o início do estol e as características logo após, pode ser necessário o uso de uma simulação de grandes escalas de turbilhão LES (Large Eddy Simulation) ou uma simulação de turbilhão

RBAC & CIA
Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

destacado DES (Detached Eddy Simulation), o que está fora do escopo deste estudo (Winslow *et al.,* 2018).

O desenvolvimento de aerofólios para aeronaves que operam em baixos números de Reynolds exige uma análise minuciosa do comportamento do fluxo de ar em diversas condições de voo e ângulos de ataque, isso requer testes rigorosos para otimizar o perfil aerodinâmico e assegurar estabilidade e desempenho, além disso, é necessário selecionar materiais com superfícies extremamente lisas e polidas, pois eles ajudam a manter o fluxo laminar, reduzindo significativamente o risco de separação da camada limite e garantindo uma performance aerodinâmica eficiente (Paula, 2016).

4.2 EXPERIMENTOS COM AEROFÓLIO DE NÚMERO NACA 0012

Superfícies aerodinâmicas e aerofólios estão inter-relacionados, mas são conceitos distintos. O aerofólio representa a forma teórica da asa, determinando sustentação e arrasto, enquanto as superfícies aerodinâmicas incluem partes da aeronave, como estabilizadores e fuselagem, que interagem com o ar para gerar essas forças e controle (Silveira, 2023). O número NACA, criado por um comitê do governo dos EUA, descreve a forma e o desempenho dos aerofólios, sendo essencial no design de aeronaves (Anderson, 2016).

O NACA 0012 é amplamente estudado e popular devido à sua simplicidade e eficácia, testado em uma ampla gama de números de Reynolds, fornece dados valiosos para validar simulações numéricas e entender o impacto do número de Reynolds no desempenho. Seu design simétrico facilita a análise e previsão de desempenho, tornando-o ideal para estudantes e engenheiros, com uma base sólida de dados experimentais obtidos em túnel de vento, No caso do NACA 0012, o primeiro dígito “0” indica que o aerofólio tem curvatura simétrica, o segundo “0” descreve a profundidade máxima da curvatura (0%), enquanto os dois últimos dígitos “12” indicam que a espessura máxima do aerofólio é de 12% da corda (Iasbeck, 2016).

RBAC&CIA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

O coeficiente de sustentação (CL) aumenta com o ângulo de ataque, atingindo seu pico em 13°. Após esse ângulo, o CL começa a diminuir. Os resultados experimentais indicam que o fluxo permanece aderido ao aerofólio até 13°, após o que a separação do fluxo na superfície superior começa a ocorrer, formando um vórtice atrás do aerofólio, fenômeno conhecido como estol. A comparação dos gráficos revela que, com o aumento do número de Reynolds, o CL também aumenta. Isso acontece porque, em números de Reynolds mais baixos, os efeitos viscosos são mais significativos, resultando em maior arrasto e limitando a sustentação máxima. Em contrapartida, em números de Reynolds mais altos, a relação sustentação-arrasto melhora (Winslow *et al.,* 2018).

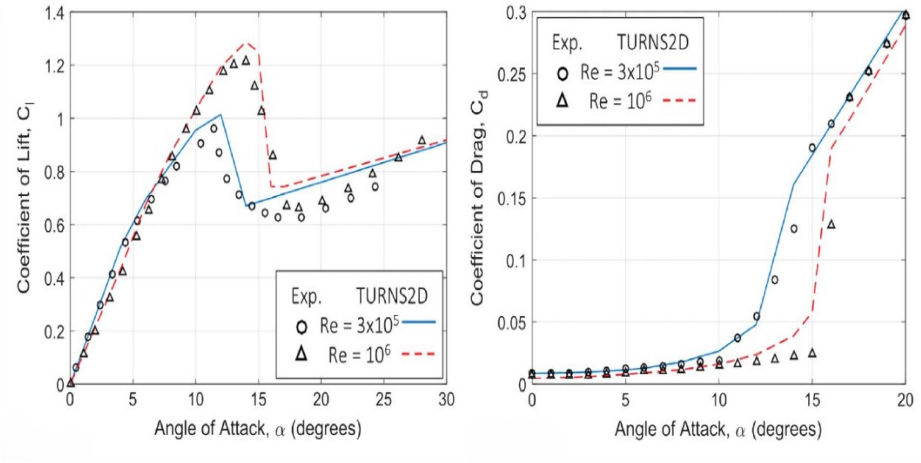
A comparação entre os dados experimentais e os resultados da simulação numérica da curva do coeficiente de arrasto para o aerofólio NACA 0012 foi realizada nos números de Reynolds 2,21 x 10^5 e 2,81 x 10^5, os resultados mostram uma boa concordância entre os valores obtidos experimentalmente e os simulados, destacando a precisão do modelo numérico utilizado (Jha, 2018).

As Figuras 7a e 7b comparam sustentação e arrasto em dois números de Reynolds: 3 × 10^5 e 1,8 × 10^6. O TURNS2D segue bem as observações experimentais, com pequenas divergências na região de estol. Observou-se uma queda de 23% no coeficiente de sustentação ao reduzir o número de Reynolds de 10^6 para 3 × 10^5, e o arrasto aumentou mais cedo, indicando separação de fluxo antecipada (Jha, 2018).

Foi observada uma curva de sustentação linear no número de Reynolds mais alto (1 milhão) e não linear no mais baixo. A não linearidade, associada à separação do fluxo, foi discutida por Ohtake et al. [16]. Uma comparação foi feita entre ângulos de ataque de 0 a 14 graus para o aerofólio NACA 0012 com Reynolds de 3 × 10^5.

RBAC&CIA
Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

Figura 7 - (A) Sustentação; (B) Arrasto



Fonte: Winslow *et al.,* (2018, p. 5)

Os coeficientes de sustentação (CL) e arrasto (CD) do aerofólio NACA 0012 revelam comportamentos interligados em resposta ao aumento do ângulo de ataque. O CL aumenta até atingir seu pico em 13°, momento em que a separação do fluxo começa a ocorrer, resultando em um vórtice e no fenômeno de estol. A análise mostra que a sustentação máxima é afetada pelo número de Reynolds, com uma maior viscosidade em valores mais baixos limitando a performance, enquanto em números mais altos, a relação sustentação-arrasto melhora (Winslow *et al.,* 2018).

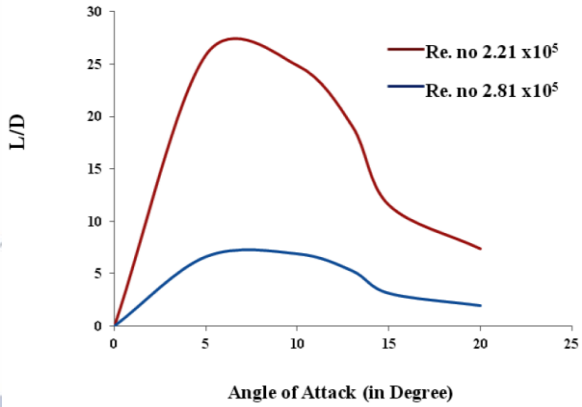
Segundo Silveira (2023) o Cd também se eleva com o ângulo de ataque, no entanto, os modelos de simulação, como o SAS, tendem a superestimar os valores de arrasto, especialmente porque não conseguem capturar corretamente a transição do fluxo laminar para o turbulento, considerando a camada limite como totalmente turbulenta. Essa superestimação resulta em coeficientes de arrasto maiores, uma vez que a camada turbulenta transporta mais energia (Silveira, 2023).

À medida que o número de Reynolds aumenta, a performance geral melhora, mas a razão sustentação/arrasto (L/D) diminui significativamente. Um aumento de 25% no número de Reynolds resulta em uma redução de 74% na razão L/D, devido à transição do fluxo para turbulento e à separação precoce da camada limite, que reduzem a sustentação e aumentam o arrasto. Em números de Reynolds baixos, o aerofólio demonstra maior capacidade de sustentação, destacando a inter-

relação entre ângulo de ataque, viscosidade do fluxo e as condições operacionais (Winslow *et al.,* 2018).

A Figura 8 apresenta uma comparação entre a relação sustentação/arrasto em função do ângulo de ataque em graus do aerofólio NACA 0012, com dois diferentes números de Reynolds, um sendo de 2,21 x 10^5, e o outro de 2,81 x 10^5.

Figura 8 - Variação da razão entre Sustentação e Arrasto com o ângulo de ataque em dois números de Reynolds diferentes.



Fonte: Jha, (2018, p. 8).

Os resultados mostram que o desempenho do aerofólio é extremamente sensível a variações de números de Reynolds abaixo de 2,81 x 10^5. Com a diminuição do número de Reynolds, observa-se um aumento no arrasto, possivelmente devido à separação prematura da camada limite laminar. Essa separação é indicada pela redução significativa na sustentação e pela diminuição do arrasto. O coeficiente de sustentação máximo diminui em cerca de 46% ao reduzir o número de Reynolds de 10^5 para 10^4 (Jha, 2018).

Ao contrário dos números de Reynolds mais altos, as curvas de sustentação são altamente não lineares, especialmente para ângulos de ataque inferiores a 5°, tornando impossível assumir um único valor de inclinação para essa faixa. Vale ressaltar que a região de arrasto é consideravelmente menor em números de Reynolds baixos. Embora o TURNS2D tenha dificuldades em prever alguns valores exatos em comparação com os experimentos, a tendência geral é capturada de forma satisfatória. Os momentos também variam significativamente com as

RBAC&CiA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

mudanças no número de Reynolds, embora uma tendência clara não seja identificável, eles ainda são previstos de forma moderada (Winslow *et al.*, 2018).

A análise do comportamento aerodinâmico do aerofólio NACA 0012 evidencia que o aumento do número de Reynolds reduz significativamente a razão sustentação/arrasto (L/D). Um incremento de 25% no número de Reynolds resulta em uma redução de 74% na razão L/D. Em números de Reynolds baixos, a sustentação apresenta maior sensibilidade devido à transição precoce do fluxo para turbulento e à separação antecipada da camada limite, o que eleva o arrasto e diminui a sustentação. O coeficiente de sustentação máximo apresenta uma redução de 46% ao passar de Reynolds 10^5 para 10^4, enquanto as curvas de sustentação perdem linearidade para ângulos abaixo de 5°, dificultando a determinação precisa da inclinação (Winslow *et al.*, 2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar a aplicação do número de Reynolds no dimensionamento de aerofólios aeronáuticos. Os resultados mostraram que a escolha do aerofólio depende das condições de voo e das necessidades específicas de cada aeronave.

Para aeronaves de baixo número de Reynolds, como drones e planadores, o perfil aerodinâmico deve ser mais arredondado e com superfície lisa, para garantir eficiência aerodinâmica, evitando a separação do fluxo e mantendo-o laminar, o que assegura boa sustentação e estabilidade, especialmente em ângulos de ataque elevados. Já para aeronaves de alto número de Reynolds, como jatos comerciais e militares, o fluxo turbulento proporciona maior aderência à superfície.

A análise revelou que não existe um único tipo de aerofólio ideal, sendo sua concepção diretamente ligada ao regime de voo e às características da aeronave. Em voos de baixa velocidade, o fluxo tende a ser laminar, resultando em menor arrasto, mas com maior risco de separação da camada limite em ângulos de ataque elevados. Em altas velocidades, o fluxo turbulento melhora a aderência à

RBAC&CiA
Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

superfície e a sustentação, mas também aumenta o arrasto devido ao movimento caótico das partículas de ar.

O estudo sobre o número de Reynolds no dimensionamento de aerofólios mostrou que o projeto do perfil deve ser ajustado conforme o regime de Reynolds esperado. A espessura e a curvatura do aerofólio devem ser ajustadas para otimizar a eficiência e garantir o desempenho adequado da aeronave em qualquer condição de voo.

Para futuras pesquisas, sugere-se a investigação de materiais utilizados na produção de aerofólios, pois diferentes materiais e acabamentos podem influenciar o comportamento do fluxo ao redor das superfícies em condições de baixo e alto número de Reynolds, impactando diretamente a performance aerodinâmica.

REFERÊNCIAS

ANDERSON JUNIOR, John David. ***Fundamentals of Aerodynamics***. 6. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Education, 2016. 1152 p.

BARBOSA, Carlos Roberto Almeida. **Guia prático para a categorização da Metodologia do Trabalho de Conclusão de Curso de graduação**: **explicações simples com exemplos de aplicação.** São Paulo: Uiclap, 2023.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 448 p.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J.; MICHTELL, John W.. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 9. ed. Belo Horizonte: Ltc, 2018. 709 p.

FRANCO, Maria Laura Puglisi Barbosa. **Análise de Conteúdo**. 5. ed. Campinas: Editora Autores Associados, 2021.

GUESSER, Silvia Zimmermann Pereira; HOBOLD, Márcia de Souza. Estado do conhecimento: contributos para o desenvolvimento da formação continuada intercultural de professores/as. **Práxis Educativa**, v. 19, p. 1-24, 2024. Disponível em: https://revistas.uepg.br/index.php/praxiseducativa/article/view/22857. Acesso em: 12. set. 2024.

RBAC&CiA
Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697

HOUGHTON, E.L.; CARPENTER, P.W.; COLLICOTT, Steven H.; VALENTINE, Daniel T.. ***Aerodynamics for Engineering Students***. 7. ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2017. 668 p.

IASBECK, Gabriel Fontes; BASILIO, Caio Teixeira; COURA, Edson Henrique Heiderich; HANRIOT, Sergio de Morais. ***Analysis of the influence of Reynolds number and maximum thickness on an aerodynamic profile***. Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia, *[S. l.]*, v. 2, n. 20, p. 72–78, 2017. DOI: 10.26512/ripe.v2i20.15005. Disponível em: https://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/15005. Acesso em: 10 nov. 2024.

JHA, S. et al. ***Effect of Reynolds number on the aerodynamic performance of NACA0012 aerofoil.*** IOP conference series. Materials science and engineering, v. 377, p. 012129, 2018.

LENZI, Greicy Kelli Spanhol; Melo, Michelle Bianchini de. **Metodologia científica** / Greicy Kelli Spanhol Lenzi, Michelle Bianchini de Melo. – Florianópolis: Publicações AEROTD, 2022.

LUTZ, T., Wurz, W., and Wagner, S., ***"Numerical Optimization and Wind- Tunnel Testing of Low Reynolds-Number Airfoils,"*** Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicles Applications, edited by T. J. Mueller, Vol. 195, AIAA, Reston, VA, 2001, pp. 169 190. doi:10.2514/5.9781600866654.0169.0190

NASA, NACA Airfoils. Disponível em: https://www.nasa.gov/image-article/naca-airfoils/. Acesso em: 11 set. 2024

PAULA, Adson Agríco de. ***The Airfoil Thickness Effects on Wavy Leading Edge Phenomena at Low Reynolds Number Regime***. 2016. 375 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com aplicações ao projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho**. Salto/SP: Edição do autor, 2014. v. 1. ISBN 978-85-918113-0-4.

ROMANOWSKI, Joana Paulin; ENS, Romilda Teodora. As Pesquisas Denominadas do Tipo "Estado da Arte" em Educação. **Revista Diálogo Educacional**, Curitiba, v. 6, n. 19, p. 37-50, set./dez de 2006. Disponível em: http://docente.ifrn.edu.br/albinonunes/disciplinas/pesquisa-em-ensino-pos.0242-posensino/romanowski-j.-p.-ens-r.-t.-as-pesquisas-denominadas-do-tipo-201cestado-da-arte201d.-dialogos-educacionais-v.-6-n.-6-p.-37201350-2006/view. Acesso em: 12. set. 2024.

RBAC&CA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
[ISSN 2763-7662]

SADRAEY, Mohammed H. ***Aircraft Design:*** *a systems engineering approach*. New Hampshire: Wiley, 2017.

SILVEIRA, Emanuel Pereira. **Simulação computacional de um perfil aerodinâmico em escoamentos de baixo número de Reynolds utilizando métodos numéricos distintos.** 2023. 84 F. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará Campus Russas, Russas, Ce, 2023.

SILVEIRA, C. R.; FLÔR, R. De C.; MACHADO, R. R. **Metodologia da pesquisa**. Florianópolis: Publicações do IF-SC, 2011.

THERMAL, nuclear power. ***Reynolds Number***. Disponível em: https://thermal-engineering.org/wp-content/uploads/2019/05/Reynolds-Number.png. Acesso em: 05 set. 2024

WINSLOW, Justin; OTSUKA, Hikaru; GOVINDARAJAN, Bharath; CHOPRA, Inderjit. **Basic Understanding of Airfoil Characteristics at Low Reynolds Numbers (104–105)**. Journal Of Aircraft, [S.L.], v. 55, n. 3, p. 1050-1061, maio 2018. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). http://dx.doi.org/10.2514/1.c034415. Acesso em: 03 set. 2024.

RBAC&CiA
Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
ISSN 2763-7697