

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

FERNANDO CÂNDIDO REZENDE DE PAULA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO RUÍDO GERADO POR UM PERFIL DE ASA COM
SLAT EM TÚNEL DE VENTO UTILIZANDO POD, SPOD E CORRELAÇÃO
CRUZADA

Joinville
2026

FERNANDO CÂNDIDO REZENDE DE PAULA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO RUÍDO GERADO POR UM PERFIL DE ASA COM
SLAT EM TÚNEL DE VENTO UTILIZANDO POD, SPOD E CORRELAÇÃO
CRUZADA

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial, no Curso de Engenharia Aeroespacial, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Filipe Dutra da Silva

Coorientador(a): Dr. Antonio Pereira

Joinville
2026

FERNANDO CÂNDIDO REZENDE DE PAULA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO RUÍDO GERADO POR UM PERFIL DE ASA COM
SLAT EM TÚNEL DE VENTO UTILIZANDO POD, SPOD E CORRELAÇÃO
CRUZADA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial, no Curso de Engenharia Aeroespacial, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 17 de junho de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Filipe Dutra da Silva
Orientador/Presidente
UFSC

Prof. Dr. Rafael Gigena Cuenca
Membro
UFSC

Prof. Dr. Daniel Sampaio de Souza
Membro
UNESP

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a meus pais, Antônio e Márcia, que, além do suporte incondicional à minha educação, sempre incentivaram meu gosto pela ciência. Sem o apoio deles, nenhuma das minhas conquistas teria sido possível, sem o amor deles, nada disso faria sentido. Ao meu irmão, Augusto, cuja dedicação e exemplo me inspiram a dar sempre o melhor de mim e à minha avó Solange, por acreditar em mim desde o primeiro dia.

Ao meu orientador, Professor Filipe Dutra, que, ao longo dos últimos três anos, me conduziu e orientou com excelência, sempre atencioso e pronto para auxiliar em qualquer obstáculo.

Ao meu coorientador e supervisor de estágio no LMFA, Antonio Pereira, por estar presente em cada etapa deste trabalho e ter confiado em mim para sua realização.

A toda a equipe do LMFA pela condução integral das campanhas experimentais, cujos resultados foram disponibilizados e utilizados nesta dissertação. Em especial a Emmanuel Jondeau, pela companhia diária e discussões valiosas, a Pierre Duquesne, pelas ricas orientações na análise POD, a Marc C. Jacob, pelo vasto conhecimento compartilhado em aeroacústica, e a Jean-Charles Vingiano e Pascal Souchotte, pelo suporte durante toda a campanha.

Ao aluno de graduação Guilherme Henrique Pick Costa, por disponibilizar o código de implementação da SPOD utilizado neste trabalho.

Agradeço ao programa MAMBO (Méthodes avancées pour la modélisation du bruit moteur et avion), coordenado pela Airbus SAS, à Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) e ao programa CAPES/BRAFITEC pelo apoio concedido, que possibilitou a realização das atividades relacionadas a este trabalho durante meu intercâmbio na França.

Por fim, e nem de longe menos importante, a todos os amigos que, de uma forma ou de outra, possibilitaram que eu chegasse tão longe sem ter perdido a cabeça. Em especial, aos meus irmãos da República Sem Saída, minha eterna gratidão por todos os momentos compartilhados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Com o aumento exponencial da frota de aeronaves global, comunidades aeroportuárias se tornaram mais suscetíveis à exposição do ruído emitido em seus entornos, podendo acarretar em sérios problemas de saúde para a população. A diminuição do ruído causado pelos motores dos aviões apresentou avanços significativos nas últimas décadas, enquanto o chamado ruído de *airframe* ganhou destaque entre as fontes principais de poluição sonora, em destaque o ruído gerado pelos slats na fase de pouso. Nesse contexto, apresenta-se neste trabalho uma análise experimental do ruído gerado por um elemento de asa equipado com um slat no túnel de vento anecoico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e de Acústica da École Centrale de Lyon em diferentes velocidades. Diversas técnicas de aquisição, como a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), uma antena de microfones e uma câmera acústica, foram empregadas a fim de identificar os principais fenômenos aerodinâmicos responsáveis pela irradiação do ruído. Além disso, diferentes métodos de pós-processamento, como a Decomposição Ortogonal Própria (POD), a POD Espectral (SPOD), métodos de identificação e rastreamento de vórtices e correlação cruzada auxiliam na interpretação dos dados obtidos. Os resultados sugerem a existência de escoamento recirculante de larga escala no interior da cavidade do slat e um fenômeno de geração de vórtices de pequena escala próximo à cúspide, cuja interação com a superfície do elemento de asa está diretamente ligada à geração de ruído.

Palavra-chave: PIV. ruído aeronáutico. slats.

ABSTRACT

With the exponential growth of the global aircraft fleet, airport communities have become increasingly exposed to noise emitted in their surroundings, which may lead to serious health problems for the population. Significant advances have been achieved in reducing noise generated by aircraft engines over the last decades, while airframe noise has become one of the main sources of noise pollution, particularly the noise generated by slats during the landing phase. In this context, this work presents an experimental analysis of the noise generated by a wing element equipped with a slat in the anechoic wind tunnel of the Fluid Mechanics and Acoustics Laboratory at École Centrale de Lyon under different flow velocities. Several measurement techniques, such as Particle Image Velocimetry (PIV), a directional microphone array, and an acoustic camera, were employed to identify the main aerodynamic phenomena responsible for noise radiation. In addition, different post-processing methods, including Proper Orthogonal Decomposition (POD), Spectral Proper Orthogonal Decomposition (SPOD), vortex identification and tracking methods, and cross-correlation analysis, were used to assist in the interpretation of the acquired data. The results suggest the existence of a large-scale recirculating flow inside the slat cavity and a small-scale vortex-generation phenomenon near the cusp, whose interaction with the wing-element surface is directly related to noise generation.

Keywords: PIV. aeronautic noise. slats.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes característicos do ruído de uma aeronave durante a decolagem e o pouso	13
Figura 2 – Principais regiões geométricas e estruturas de escoamento associadas a um slat	19
Figura 3 – Influência da adição de slat na curva de C_l	20
Figura 4 – Esquema clássico de PIV realizado em túnel de vento.	23
Figura 5 – Esquema das variáveis da função Γ_1	29
Figura 6 – Fotografia da configuração experimental ilustrando o bocal convergente, o aerofólio (laranja) e o slat (preto). Alguns microfones de diretividade são visíveis ao fundo.	32
Figura 7 – Modelo de dois elementos usado no estudo. A linha vermelha tracejada representa a configuração retraída	32
Figura 8 – Conjunto de microfones e sistema de PIV montados simultaneamente	34
Figura 9 – Câmera acústica.	35
Figura 10 – Captadores de pressão instalados sobre o elemento da asa	36
Figura 11 – Esquema do sistema de aquisição de pressão estática e flutuações de pressão	37
Figura 12 – Posições dos canais de tomada de pressão	37
Figura 13 – Setup do PIV	38
Figura 14 – Regiões de interesse do PIV	39
Figura 15 – Intensidade da turbulência na saída do convergente do túnel de vento, $U_\infty = 50$ m/s	44
Figura 16 – Campos médios de velocidade obtidos por PIV na região do slat . .	45
Figura 17 – Comparação entre os campos médio e instantâneo de vorticidade obtidos por PIV	45
Figura 18 – Comparação entre coeficiente de pressão (C_p) medido durante as campanhas de teste VALIANT e MAMBO	47
Figura 19 – Espectro acústico do microfone de referência M4 em nível de pressão sonora para as três velocidades de escoamento em função da frequência	48
Figura 20 – Espectro acústico do microfone de referência M4 em nível de pressão sonora para as três velocidades de escoamento em função do número de Strouhal	49
Figura 21 – Diretividade em OASPL	50
Figura 22 – Localização das fontes de ruído utilizando a câmera acústica. Faixa de frequência: 3625 - 4025 Hz.	50

Figura 23 – Localização das fontes de ruído utilizando a câmera acústica. Faixa de frequência: 4275 - 4700 Hz.	51
Figura 24 – Posições dos canais de tomada de pressão	51
Figura 25 – Densidade espectral de potência dos captosres de flutuação de pressão, $U_{\infty} = 50$ m/s	52
Figura 26 – Energia dos modos da POD	54
Figura 27 – Modos 1, 2, 4, 5, 8 e 10 da componente horizontal de velocidade a 25m/s	54
Figura 28 – Correlação cruzada entre um par de execuções	55
Figura 29 – Distribuição energética dos modos SPOD a $U_{\infty} = 25$ m/s para a componente de velocidade U	57
Figura 30 – Primeiros 3 modos em quatro frequências representativas em $U_{\infty} = 25$ m/s	58
Figura 31 – Γ_1 e Γ_2 aplicadas ao escoamento original do PIV	59
Figura 32 – Comparação de Γ_1 e Γ_2 para as duas reconstruções do escoamento	61
Figura 33 – Trajetória dos vórtices para três velocidades distintas	61
Figura 34 – Mapas do coeficiente de correlação cruzada R entre dados de velocidade e acústica para o microfone M4	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Velocidades de escoamento e respectivos números de Reynolds baseados na corda do aerofólio.	33
Tabela 2 – Parâmetros do escoamento livre utilizados no cálculo do coeficiente de pressão para cada condição de ensaio.	47
Tabela 3 – Modos de corte para parcelas altamente e moderadamente correlacionadas do escoamento em função da zona de PIV e da velocidade nominal do escoamento.	56

LISTA DE SÍMBOLOS

a_i	Coeficiente temporal do Modo i
c	Corda da asa (slat retraído)
f	Frequência (Hz)
f_s	Frequência de amostragem do PIV
k_{high}	Modo de corte para modos da POD altamente correlacionados
k_{mod}	Modo de corte para modos da POD moderadamente correlacionados
N	Número de pontos contidos na janela de interrogação
R	Coeficiente de correlação
Re_c	Número de Reynolds baseado na corda
s	Corda do slat
St	Número de Strouhal
U	Componente horizontal de velocidade
u'	Flutuações da componente horizontal de velocidade
U_∞	Velocidade do escoamento livre
V	Componente vertical de velocidade
$ \mathbf{V} $	Magnitude da velocidade
Γ_1, Γ_2	Funções de probabilidade para indentificação de vórtices
θ_M	Ângulo entre $\overline{PM}$ e $\mathbf{U}_M$
ω	Vorticidade
$\mathbf{U}_M$	Vetor velocidade da célula M
S	Janela de interesse
$\overline{PM}$	Vetor posição da célula M em relação ao ponto P
C_p	Coeficiente de pressão
T	Período
NPS	Nível de Pressão Sonora
P_{RMS}	Raiz da pressão quadrática média
P_{ref}	Pressão acústica de referência
p	Pressão acústica
τ	Atraso entre dados acústicos e de PIV
σ	Desvio padrão
δ_s	Ângulo de deflexão do slat
$OASPL$	Nível Geral de Pressão Sonora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	CONCEITOS DE TURBULÊNCIA	16
2.1.1	Camada de cisalhamento e estruturas de vórtices	17
2.2	INTRODUÇÃO A ACÚSTICA	18
2.2.1	Ruído de slat	19
2.3	TÉCNICAS EXPERIMENTAIS EM AEROACÚSTICA	21
2.3.1	Medições Acústicas	21
2.3.2	Medições de Pressão de Parede	22
2.3.3	Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)	23
2.4	MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS	24
2.4.1	Transformada de Fourier	24
2.4.2	Densidade Espectral de Potência	25
2.4.3	Decomposição Ortogonal Própria (POD)	26
2.4.4	Decomposição Ortogonal Própria Espectral (SPOD)	27
2.4.5	Identificação e Rastreo de vórtices	28
2.4.6	Correlação Cruzada	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	31
3.2	GEOMETRIA DO PERFIL TESTADO	31
3.3	TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS	33
3.3.1	Aquisição acústica	33
3.3.2	Medições de pressão	35
3.3.3	Coeficiente de pressão	36
3.3.4	Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)	38
3.4	PÓS-PROCESSAMENTO DOS DADOS	40
3.4.1	Aplicação da POD aos campos PIV	40
3.4.2	Aplicação da SPOD aos campos PIV	42
3.4.3	Correlação cruzada entre velocidade e pressão acústica	42
4	RESULTADOS	43
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA SAÍDA DO CONVERGENTE	43

4.2	RESULTADO DO PÓS-PROCESSAMENTO DAS MEDIÇÕES PIV .	44
4.3	COEFICIENTE DE PRESSÃO	46
4.4	TRATAMENTO DOS DADOS ACÚSTICOS	48
4.5	PRESSÃO DE PAREDE	51
4.6	RESULTADO DA ANÁLISE POD	53
4.7	RESULTADO DA ANÁLISE SPOD	56
4.8	IDENTIFICAÇÃO DE VÓRTICES	58
4.9	CORRELAÇÃO CRUZADA	60
5	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o nível de ruído gerado por aeronaves ganhou destaque durante a década de 1960 com o aumento do tráfego aéreo e a demanda por aviões e motores potentes. Comunidades residentes próximas aos aeroportos passaram a queixar-se cada vez mais da poluição sonora, que pode causar impactos como perda auditiva, degradação do desempenho de tarefas, redução da inteligibilidade da fala, interrupção do sono e sentimentos gerais de incômodo (Powell; Fields, 1992).

Com a chegada de motores turbofan de alto bypass, que são mais silenciosos quando comparados aos motores a jato, o ruído proveniente da estrutura da aeronave, o chamado ruído de airframe, passou a ser a principal fonte de poluição sonora (Yu; Zorumski, 1997). Este ruído é caracterizado pela formação de uma camada limite turbulenta que, ao interagir com sólidos e principalmente estruturas com terminações afiadas, acarreta numa intensidade acústica que evolui proporcionalmente à quinta potência do número de Mach local (Ffowcs-Williams; Hall, 1970).

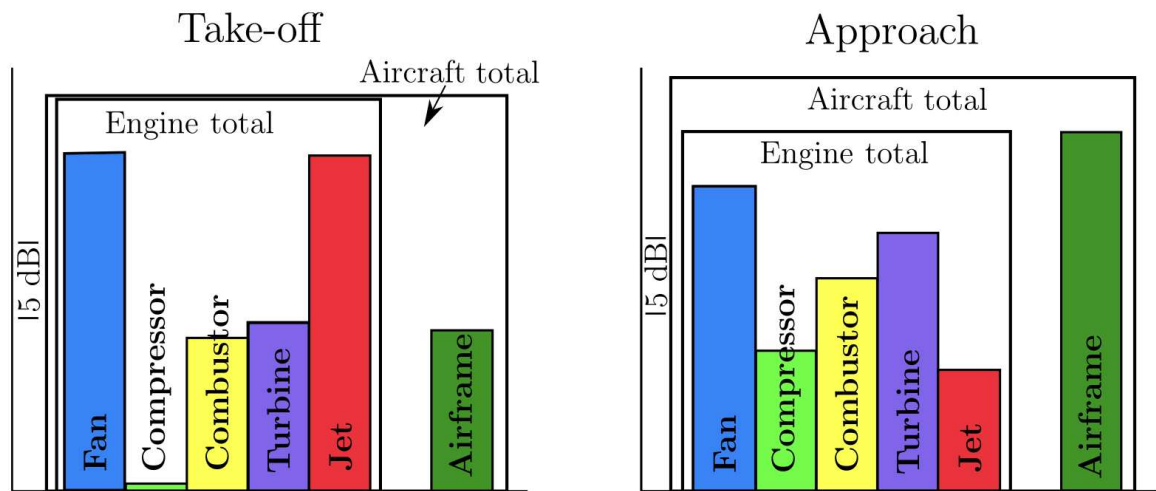
Segundo evidenciado por Proença (2018) na Figura 1, o ruído de airframe na fase de aproximação é consideravelmente superior quando comparado ao da fase de decolagem. Dentre as fontes de ruído durante o pouso, o slat, junto aos trens de pouso, se mostra como uma das principais fontes de poluição sonora.

Dada essa situação, reduzir o número de pessoas expostas ao ruído aeronáutico tornou-se uma prioridade para a Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO, 2016), que, em 2014, incorporou o Capítulo 14 ao Anexo 16, levando a uma redução de 7 dB no nível efetivo de ruído percebido (EPNdB) máximo permitido em relação aos limites anteriores. No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) segue as mesmas diretrizes, exigindo que as operações aeroportuárias garantam níveis de pressão sonora inferiores a 65 EPNdB de exposição às comunidades próximas (ANAC, 2024).

Segundo a ICAO (2016), a estimativa é de que até 2036 mais de 1 milhão de pessoas sejam removidas de áreas expostas a níveis superiores a 55 dB. Além dos benefícios à saúde, a redução do ruído de aeronaves pode ter um impacto significativo na economia, haja vista que a diminuição do nível sonoro em 1dB acumulado em um dia inteiro pode levar ao aumento de 20% da frota de aeronaves apta a operar sob as restrições regulamentares de ruído, uma vez que mais modelos passam a atender aos limites máximos de emissão sonora estabelecidos para certificação e operação (Filippone, 2014).

É nesse contexto que compreender a dinâmica do ruído gerado por dispositivos hiper sustentadores, como slats e flaps, se torna essencial, pois, diferente de outras fontes de ruído, o progresso relativo à compreensão dos fenômenos nesses

Figura 1 – Componentes característicos do ruído de uma aeronave durante a decolagem e o pouso



Fonte: Proença (2018, p. 14).

dispositivos ainda é incipiente. Pesquisas iniciais identificaram que o ruído de slats é dominado por mecanismos de instabilidade no escoamento, especialmente na região da cavidade (ou cova) dos slats (Guo, 2002; Dam, 2002). Essas pesquisas utilizaram técnicas como medições em túneis de vento e simulações computacionais para entender os mecanismos de geração de ruído.

O escoamento na região da cavidade do slat foi analisado com mais detalhe por Takeda *et al.* (2001) utilizando técnicas de Particle Image Velocimetry (PIV - Velocimetria por Imagem de Partículas), pressão de parede e beamforming. Essa análise permitiu identificar uma relação direta entre as estruturas coerentes do fluxo, como vórtices do tipo Kelvin-Helmholtz, e os padrões do ruído emitido. Além disso, Pascioni e Cattafesta (2018) evidenciaram a influência do ângulo de ataque na localização e intensidade das fontes acústicas e reforçou-se a dominância do slat como fonte principal de ruído em configurações de alta sustentação.

Terracol *et al.* (2016) investigaram os mecanismos de geração de ruído na região da cova do slat por meio de simulações híbridas não estacionárias, cujo objetivo foi descrever com precisão a dinâmica do escoamento interno da cova do slat e os processos responsáveis pela emissão sonora. A partir dessas simulações, os autores realizaram uma análise detalhada das estruturas coerentes formadas no interior da cavidade, identificando instabilidades que levam à emissão de ruído tonal. Os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais disponíveis, permitindo validar a precisão das previsões e reforçar a relevância da abordagem adotada. Apesar da qualidade dos resultados, os autores destacam a necessidade de estudos complementares que aprofundem a correlação entre as estruturas do escoamento e as fontes acústicas.

Henning *et al.* (2012) realizaram um experimento com o objetivo de investigar a relação entre estruturas do escoamento na região da cova do slat e o ruído irradiado e, para isso, combinaram medições sincronizadas de PIV com microfones, utilizando técnicas de correlação cruzada. Através dessas, os autores identificaram que estruturas coerentes geradas na camada de cisalhamento do escoamento, na região da cova do slat, apresentavam uma forte associação com os picos tonais observados no espectro de ruído. Isso reforça a hipótese de que essas estruturas são responsáveis pelos mecanismos dominantes de geração de ruído em configurações de alta sustentação.

Mironov *et al.* (2012) analisaram o impacto do uso de chevrons (essencialmente bordos de fuga serrilhados) aplicados ao slat como método de redução de ruído e demonstraram que essa modificação geométrica pode levar a uma atenuação significativa de componentes de ruído em bandas estreitas, particularmente em ângulos de ataque moderados. Essa redução foi associada à diminuição da correlação espacial das estruturas de vórtice ao longo da envergadura, reduzindo a eficiência da radiação acústica da fonte sonora.

Souza *et al.* (2019) investigaram os mecanismos de geração de ruído em um modelo de asa equipado com slat por meio de simulações tridimensionais não estacionárias. A partir da aplicação da Decomposição Ortogonal Própria (POD), os autores identificaram que as estruturas mais associadas à emissão acústica correspondem a vórtices coerentes do tipo Kelvin-Helmholtz presentes na camada de cisalhamento da cova do slat. Além disso, os resultados evidenciaram que estruturas energeticamente dominantes do escoamento nem sempre estão diretamente relacionadas à radiação sonora, destacando o potencial da POD para investigar a correlação entre fenômenos aerodinâmicos e aeroacústicos em configurações de alta sustentação.

Considerando esse cenário, apresenta-se neste trabalho uma análise experimental do ruído gerado por um perfil de asa com slat em túnel de vento, correlacionando as estruturas do escoamento com as fontes acústicas identificadas por técnicas de beamforming e pós-processamento. A proposta se assemelha aos resultados de Pascioni e Cattafesta (2018) e Henning *et al.* (2012) quanto ao foco na identificação dos principais fenômenos de geração de ruído através da correlação cruzada e se diferencia dos mesmos quanto à abordagem combinada de PIV, câmera acústica e decomposição modal.

A metodologia utilizada inclui o uso do túnel de vento anecóico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Acústica (LMFA) da École Centrale de Lyon, com ensaios realizados entre 2023 e 2025. Foram utilizados um perfil de asa equipado com slat, instrumentos de medição acústica, do fluxo de ar e de pressão parietal, além de técnicas de processamento, como a POD, a Decomposição Ortogonal Própria Espectral (SPOD), identificação de vórtices e correlação cruzada.

1.1 OBJETIVOS

Diante da crescente preocupação com o ruído gerado por aeronaves, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo geral

Analisar experimentalmente o ruído gerado por um perfil de asa com slat em túnel de vento, correlacionando as estruturas do escoamento com as fontes acústicas identificadas por técnicas de diretividade, beamforming e pós-processamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender o comportamento do escoamento na região da cavidade do slat a partir das medições obtidas através da PIV;
- Identificar os fenômenos dominantes do escoamento que contribuem para a geração de ruído, por meio da POD e da SPOD;
- Demonstrar o conteúdo espectral do ruído irradiado por meio de técnicas de Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Densidade Espectral de Potência (PSD);
- Localizar as regiões mais emissoras de ruído utilizando beamforming com câmara acústica;
- Correlacionar as estruturas observadas no escoamento com as fontes acústicas, buscando evidências dos mecanismos responsáveis pela emissão sonora.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise do ruído gerado por slats exige a compreensão de conceitos fundamentais de escoamentos turbulentos, estruturas coerentes e mecanismos de geração e propagação sonora. Este capítulo apresenta os princípios teóricos que embasam essas ideias, com ênfase nos fenômenos aparentes entre o escoamento turbulento e a emissão acústica.

Nesse contexto, serão introduzidas noções essenciais que permitem a interpretação dos fenômenos envolvidos ao longo do trabalho, especialmente na cavidade do slat e na camada cisalhante. Além disso, diferentes técnicas de análise de dados foram aplicadas aos campos obtidos, incluindo Transformada Rápida de Fourier (FFT), Decomposição Ortogonal Própria (POD), identificação de vórtices e correlação cruzada entre os campos de escoamento e os sinais acústicos.

2.1 CONCEITOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência é um fenômeno que está presente em praticamente todos os escoamentos, sejam naturais ou industriais, e se caracteriza por flutuações de caráter caótico em propriedades como velocidade, pressão e temperatura. Embora possa parecer desordenada, a turbulência é um processo determinístico e não-linear, regido pelas equações de Navier–Stokes, mas que é extremamente sensível às condições iniciais e de contorno (Pope, 2000; Neto, 2020). Essa sensibilidade torna inviável a previsão pontual do escoamento, sendo mais apropriado realizar um estudo estatístico de suas propriedades.

Um dos principais indicadores da presença de turbulência é o número de Reynolds, definido como,

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

onde ρ é a densidade do fluido, V é a velocidade característica, L é uma escala de comprimento e μ é a viscosidade dinâmica.

A função do número de Reynolds é comparar as forças inerciais com as forças viscosas em um escoamento. Quando esse número atinge valores críticos, a depender da geometria, condições de contorno e das características do escoamento, as forças viscosas não conseguem mais controlar as perturbações do escoamento, o que favorece o surgimento de instabilidades que se desenvolvem em estruturas turbilhonares de diferentes escalas (Mathieu; Scott, 2000). Essas estruturas vão desde grandes regiões coerentes até as chamadas escalas de Kolmogorov, onde a energia cinética é dissipada por efeitos viscosos.

A teoria da cascata de energia, proposta por Richardson e depois formalizada por Kolmogorov, explica como a energia das maiores estruturas turbulentas é transferida para escalas menores até ser dissipada pela viscosidade (Richardson, 1922). Para descrever matematicamente esse comportamento, Reynolds introduziu uma decomposição da velocidade instantânea em componentes média e flutuante, o que possibilitou derivar as equações médias de movimento e introduzir o tensor de Reynolds, que modela o transporte adicional de quantidade de movimento causado pela turbulência (Mathieu; Scott, 2000).

2.1.1 Camada de cisalhamento e estruturas de vórtices

Camadas de cisalhamento, ou camadas de mistura, são regiões caracterizadas por intensos gradientes de velocidade entre fluidos adjacentes a diferentes velocidades. Essas regiões assumem um papel importante nos fenômenos de separação e de formação de vórtices. Em configurações aerodinâmicas envolvendo descolamento do escoamento, como em cavidades e dispositivos sustentadores, a camada de cisalhamento governa o comportamento instável de larga escala do escoamento (Howe, 1998).

Um dos principais mecanismos de instabilidade associados à camada de cisalhamento são as instabilidades de Kelvin-Helmholtz, que descrevem como pequenas perturbações na camada se intensificam à medida que são transportadas pelo escoamento, eventualmente se transformando em estruturas coerentes de vórtice. Esse processo leva à formação de vórtices de larga escala, emparelhamento de vórtices e à transição ao regime turbulento. Ho e Huerre (1984) relataram um comportamento sensível da camada de cisalhamento quando perturbações são provocadas, caracterizando um intenso crescimento da instabilidade em função do gradiente de velocidade e da espessura da camada. De maneira similar, Brown e Roshko (1974) demonstraram que camadas de mistura turbulenta são dominadas principalmente por estruturas de larga escala organizadas que regem a incorporação turbulenta e o transporte do momento.

Em escoamentos separados, a interação entre a camada de cisalhamento e estruturas sólidas próximas corroboram no aparecimento de outros fenômenos de instabilidades. Conforme são transportados, os vórtices desprendidos podem influenciar no comportamento do escoamento a jusante, seja impactando superfícies ou influenciando no gradiente de pressão de outras regiões. Rossiter (1964) demonstrou que escoamentos em cavidade podem desenvolver oscilações auto-sustentadas devido à interação entre vórtices convectivos e perturbações acústica retroalimentadas. Mais tarde, Rockwell e Naudascher (1979) discutiu o comportamento oscilatório de camadas cisalhantes, enfatizando a importância de mecanismos de retroalimentação entre estruturas hidrodinâmicas e ondas acústicas.

2.2 INTRODUÇÃO A ACÚSTICA

Segundo Bistafa (2018), o som pode ser definido como a percepção de variação de pressão ambiente pelo sistema auditivo, enquanto o ruído é geralmente entendido como um som indesejável ou sem harmonia, estando frequentemente associado a uma percepção negativa. O limiar inferior de percepção de variação de pressão do sistema auditivo humano é de $20 \mu\text{Pa}$, para um ser humano jovem e saudável a 1000 Hz , sendo este o valor referencial (P_{ref}) para se calcular o nível de pressão sonora.

Em níveis elevados de intensidade sonora, flutuações de pressão eficazes (P_{RMS}) da ordem de 200 Pa são frequentemente associadas ao limiar da dor, embora níveis de pressão sonora superiores a esse valor ainda possam ser observados em determinadas situações. A ampla faixa de pressões perceptíveis pelo ouvido humano, aliada ao fato de que sua sensibilidade varia aproximadamente de forma logarítmica em relação à intensidade sonora, torna conveniente e fisicamente adequada a utilização de uma escala logarítmica para a quantificação dos fenômenos acústicos (Bistafa, 2018).

Uma característica importante dos sinais acústicos é sua frequência, que está associada à taxa de oscilação das variações de pressão que compõem a onda sonora. Em fenômenos periódicos, define-se o período (T) como o intervalo de tempo necessário para que uma oscilação complete um ciclo. A frequência (f), por sua vez, corresponde ao número de ciclos realizados por unidade de tempo e é expressa em hertz (Hz), definida por

$$f = \frac{1}{T}, \quad (2)$$

Como as oscilações de pressão sonora variam continuamente no tempo, utiliza-se frequentemente a pressão eficaz (RMS) como uma medida representativa da amplitude do sinal acústico (Gerges, 1992). A pressão eficaz P_{RMS} é definida por

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}, \quad (3)$$

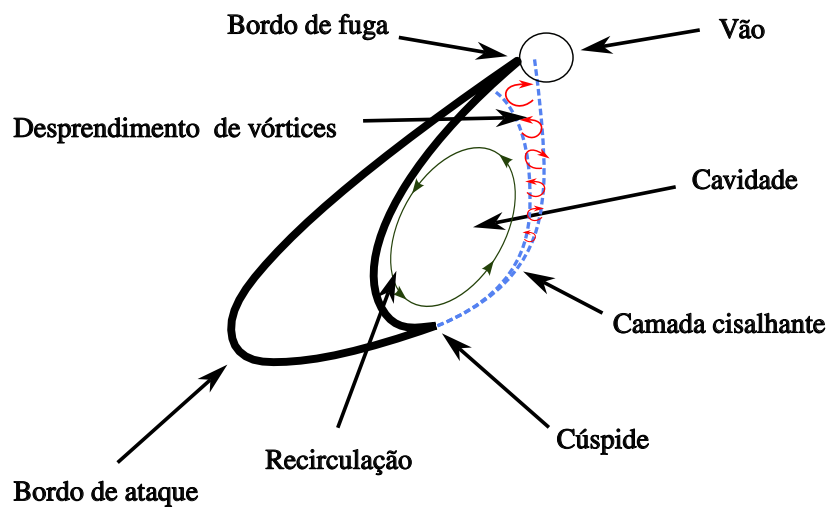
onde $p(t)$ é o sinal temporal de pressão e T corresponde ao intervalo de tempo considerado.

A partir da pressão eficaz, define-se o nível de pressão sonora (NPS) por

$$NPS = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{RMS}^2}{P_{ref}^2} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{RMS}}{P_{ref}} \right) \text{ dB}. \quad (4)$$

A utilização de uma escala logarítmica permite representar de forma compacta a ampla faixa de amplitudes encontradas em fenômenos acústicos. Além disso, devido à natureza logarítmica da escala, a duplicação de uma grandeza proporcional a

Figura 2 – Principais regiões geométricas e estruturas de escoamento associadas a um slat



Fonte: Autor (2026).

P_{RMS}^2 resulta em um aumento de aproximadamente 3 dB no nível de pressão sonora (Gerges, 1992).

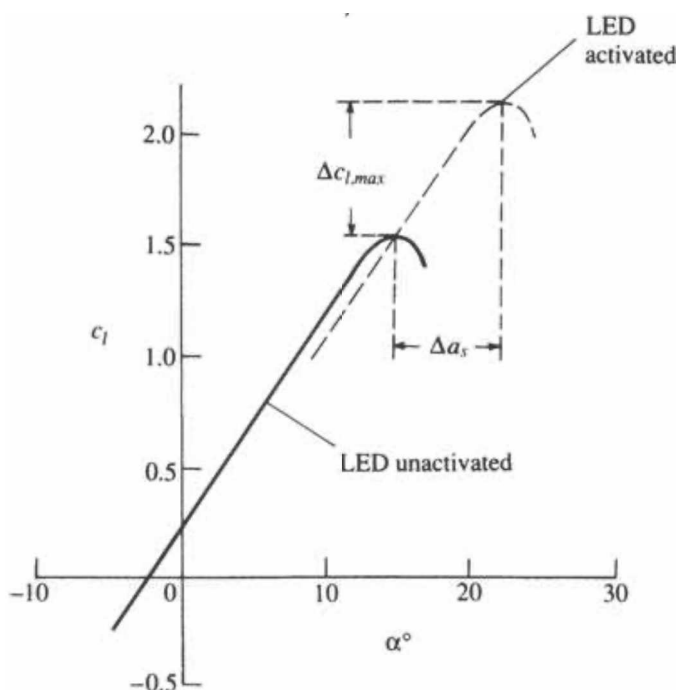
2.2.1 Ruído de slat

Na aviação comercial, principalmente nas fases de pouso e decolagem, o ruído causado pelos slats é uma preocupação importante. Aeronaves comerciais são projetadas para operar com elevada carga alar, o que favorece a eficiência aerodinâmica durante o voo de cruzeiro, mas exige coeficientes de sustentação significativamente mais elevados em baixas velocidades. Nesse contexto, torna-se essencial a utilização de dispositivos hipersustentadores, como os slats, para aumentar a sustentação durante essas fases do voo. A fim de padronizar a nomenclatura utilizada neste trabalho, a Figura 2 ilustra as diferentes regiões de interesse de um elemento de slat.

A função do slat se resume na formação de um vão entre o slat e o elemento principal, permitindo que o escoamento energize a camada limite a jusante do elemento e retarde a separação da camada limite na asa. O slat, portanto, fornece um aprimoramento no desempenho do coeficiente de sustentação máximo ($C_{l_{max}}$). A Figura 3 apresenta a variação de C_l em função do ângulo de ataque (AoA), onde a linha contínua representa a configuração sem a utilização do Dispositivo de Bordo de Ataque (LED), enquanto a linha tracejada corresponde à configuração com slat estendido.

Segundo Smith (1975), a melhora no desempenho aerodinâmico promovida

Figura 3 – Influência da adição de slat na curva de C_l



Fonte: Anderson (2007, p. 403)

pelos slats provém de alguns mecanismos causados pela interação entre os elementos do aerofólio. Entre eles destacam-se a redução do pico de sucção no elemento principal, o aumento da circulação no slat, a descarga da esteira em regiões de maior velocidade e a formação de uma nova camada limite em cada um dos elementos.

Apesar de ser benéfico para a aerodinâmica, a adição de um slat gera um campo de escoamento altamente instável. À medida que o escoamento passa pela cúspide, uma camada de cisalhamento se desenvolve na região entre o fluido externo a alta velocidade e a região de recirculação no interior da cavidade do slat. As instabilidades geradas nessa camada de cisalhamento provocam o surgimento de estruturas coerentes de vórtice que se propagam em direção à região de recolamento e ao vão do slat (Choudhari; Khorrami, 2007).

Investigações numéricas e experimentais comprovaram que o escoamento na cavidade do slat é caracterizado por uma região de recirculação limitada pela camada de cisalhamento. Ensaio utilizando PIV conduzidos por Jenkins *et al.* (2004) revelaram que as estruturas de vórtice geradas na cúspide e propagadas na camada de cisalhamento podem ser capturadas por essa recirculação e dissipadas na cavidade ou ejetadas através do vão do slat em direção ao elemento principal.

A interação entre esses vórtices e estruturas sólidas é considerada um dos principais mecanismos de geração de ruído em slats. Knacke e Thiele (2008) mostraram que o impacto dos vórtices da camada de cisalhamento na superfície inferior

do slat produz flutuações de pressão intensas próximo à região de recolamento, enquanto a aceleração destes através do vão contribui para a irradiação de ruído de banda larga.

Além disso, estudos relataram a presença de picos de banda estreita associados a mecanismos de retroalimentação acústica no interior da cova. Essas oscilações normalmente são comparadas a ressonâncias de cavidade do tipo Rossiter, em que as ondas acústicas geradas pelo impacto dos vórtices se propagam a montante e provocam novas instabilidades na região da cavidade (Casalino *et al.*, 2022). Para o ruído tonal de slat, é comum observar picos espectrais associados a números de Strouhal entre 1 e 5, calculados com base na corda do slat (St_s) (Roger; Pérennès, 2000).

O número de Strouhal é definido por

$$St_s = \frac{f s}{U_\infty}, \quad (5)$$

em que f é a frequência característica do fenômeno analisado, s é a corda do slat como comprimento característico associado ao escoamento e U_∞ é a velocidade do escoamento livre.

2.3 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS EM AEROACÚSTICA

2.3.1 Medições Acústicas

Medições acústicas têm um papel fundamental em investigações aeroacústicas, possibilitando a quantificação e caracterização do som gerado por escoamentos. Ao medir flutuações de pressão produzidas pela propagação de ondas acústicas, é possível identificar frequências dominantes, avaliar a intensidade sonora e investigar mecanismos físicos responsáveis pela geração e irradiação do som (Goldstein, 1976).

A geração de ondas acústicas pode ser interpretada através de modelos de fontes acústicas. Seguindo a analogia proposta por Lighthill (1952) e posteriormente as de Curle (1955) e Ffowcs-Williams e Hawkings (1969), fontes sonoras são comumente classificadas de acordo com suas características de irradiação. Fontes de monopolos são associadas a flutuações de massa ou volume, dipolos vêm de forças não-estacionárias agindo sobre superfícies sólidas e quadrupolos se originam em regiões em que flutuações induzidas por turbulência são predominantes (Lighthill, 1952).

Para configurações de escoamento a baixo número de Mach em aerofólios equipados com dispositivos hipersustentadores, o ruído é predominantemente associado a fontes dipolares decorrentes das flutuações de carregamento aerodinâmico sobre as superfícies. Isso se deve ao fato de que, para essas configurações, os quadrupolos do escoamento turbulento livre são fontes menos eficientes de ruído (Blake, 1986).

Flutuações de pressão acústica são tipicamente medidas utilizando microfones, que convertem as variações de pressão em sinais elétricos de intensidade proporcional. Microfones são caracterizados principalmente pela sua sensibilidade, que define a razão entre a pressão medida e o sinal elétrico de saída, e a resposta em frequência, que determina em qual faixa de frequência o sinal pode ser capturado adequadamente (Brüel & Kjær, 1996).

Enquanto um único microfone fornece informação em uma posição específica, múltiplos microfones podem ser combinados em uma rede a fim de obter uma caracterização espacial do campo acústico. Como as ondas sonoras atingem os sensores em instantes ligeiramente defasados, as informações de fase e amplitude podem revelar dados de posição e diretividade das fontes sonoras (Mueller, 2002).

Além disso, é importante caracterizar o espectro medido entre suas diferentes componentes de frequência. O ruído tonal aparece como picos discretos em frequências específicas e está associado a fenômenos periódicos. Em contraste, o ruído de banda larga apresenta uma distribuição energética varrendo uma ampla gama de frequência, tipicamente associado a flutuações turbulentas (Pope, 2000).

2.3.2 Medições de Pressão de Parede

A medição de pressão de parede é amplamente utilizada em estudos aerodinâmicos e aeroacústicos para investigar a interação entre o escoamento turbulento e superfícies sólidas. As flutuações de pressão registradas na superfície contêm informações sobre fenômenos como separação da camada limite, desprendimento de vórtices, instabilidades de camada cisalhante e mecanismos de geração de ruído (Amiet, 1976). Dessa forma, a análise desses sinais permite relacionar características do escoamento com suas consequências acústicas.

Vale destacar que, à luz da formulação de Ffowcs-Williams e Hawkings (1969), os dipolos associados ao ruído de carregamento dependem exclusivamente do campo de pressão na superfície, uma vez que o efeito das tensões viscosas é frequentemente desprezado em altos números de Reynolds.

Em aplicações experimentais, as medições podem ser realizadas por meio de tomadas de pressão distribuídas ao longo da superfície do modelo. Em muitas configurações, os sensores são instalados remotamente e conectados às tomadas de pressão por pequenos dutos ou canais. Essa abordagem reduz a interferência do sensor no escoamento e possibilita a instrumentação de geometrias complexas. Entretanto, a presença desses canais altera a resposta dinâmica do sistema de medição, introduzindo efeitos de amplitude e fase dependentes da frequência. O conjunto formado pela tomada de pressão, pelo canal e pelo volume associado ao sensor passa a apresentar comportamento acústico próprio, exigindo procedimentos de calibração para a correta reconstrução do sinal de pressão na parede (Leclère *et al.*, 2016).

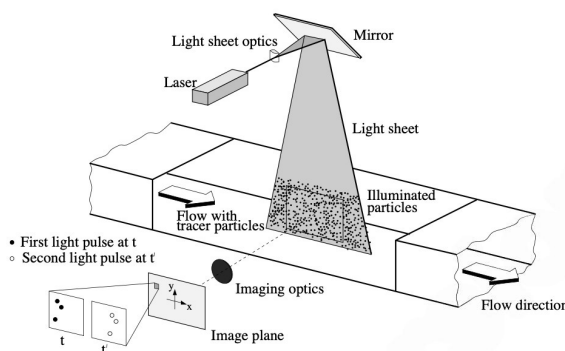
Para compensar tais efeitos, é comum determinar a função de resposta em frequência (FRF) de cada canal de medição. A FRF descreve a relação entre a pressão aplicada na entrada da tomada e o sinal registrado pelo sensor, permitindo corrigir distorções introduzidas pela dinâmica acústica do conjunto formado pela tomada de pressão, canal e sensor. A utilização dessa correção é particularmente importante em análises espectrais e aeroacústicas, nas quais a preservação da amplitude e da fase dos sinais é essencial para a identificação dos mecanismos físicos envolvidos (Leclère *et al.*, 2016).

2.3.3 Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)

A Velocimetria por Imagem de Partículas é uma técnica de visualização de fluxo não-intrusiva amplamente utilizada para a caracterização de escoamentos turbulentos. Diferentemente de métodos de medições pontuais, a PIV fornece informações instantâneas da velocidade sobre um plano de medição completo, permitindo a análise detalhada de estruturas espaciais instáveis presentes em um escoamento.

Uma configuração típica de PIV consiste em quatro componentes principais: partículas traçadoras, uma fonte de iluminação, um sistema de aquisição de imagem e algoritmos de processamento de dados. As partículas devem ser pequenas o suficiente para não influenciarem na dinâmica do escoamento e a iluminação é comumente proporcionada por um laser pulsante combinado com elementos ópticos, como lentes e espelhos, que transformam o feixe em uma lâmina plana de luz. Duas imagens sucessivas das partículas iluminadas são capturadas pela câmera, em um pequeno intervalo de tempo e para uma determinada região de interesse, e o deslocamento dessas partículas entre uma aquisição e outra é então usado para determinar o valor da velocidade local usando técnicas de correlação cruzada (Raffel *et al.*, 2007). A Figura 4 apresenta uma configuração clássica de PIV adquirido em túnel de vento.

Figura 4 – Esquema clássico de PIV realizado em túnel de vento.



Fonte: Raffel *et al.* (2007, p. 4).

Existem várias versões de PIV, a depender da configuração experimental. Dentre elas, a PIV 2D, o formato mais básico supracitado, PIV tomográfica (Tomo-

PIV), capaz de adquirir medições em um volume e PIV resolvida no tempo (TR-PIV), quando a frequência de aquisição é elevada. Devido sua alta resolução espacial e por se tratar de uma técnica não-intrusiva, a PIV é amplamente empregada em investigações envolvendo escoamentos aerodinâmicos e será fundamental para as análises realizadas neste trabalho.

2.4 MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados obtidos por técnicas experimentais contêm uma vasta quantidade de informações temporais e espaciais, cuja interpretação direta nem sempre é suficiente para identificar os fenômenos físicos dominantes. Dessa forma, métodos de processamento e análise de dados são empregados para extrair características relevantes dos sinais e campos medidos, permitindo investigar padrões recorrentes, estruturas coerentes e relações entre diferentes variáveis do escoamento e do campo acústico.

Neste trabalho, são utilizados métodos de análise espectral, decomposição modal e identificação de estruturas de vórtice para caracterizar a dinâmica do escoamento e sua relação com a geração de ruído. Além disso, a técnica de correlação cruzada é empregada para investigar a interação entre flutuações aerodinâmicas e acústicas. As subseções a seguir apresentam os fundamentos teóricos dos principais métodos utilizados, incluindo a Transformada Rápida de Fourier (FFT), a Decomposição Ortogonal Própria (POD), a Decomposição Ortogonal Própria Espectral (SPOD), os critérios de identificação vortical e a correlação cruzada.

2.4.1 Transformada de Fourier

A representação de sinais como uma combinação de componentes harmônicos se originou dos trabalhos de Joseph Fourier, que demonstrou como fenômenos periódicos complexos podem ser descritos como uma superposição de funções senoidais de diferentes frequências. Esse conceito se tornou um dos fundamentos do processamento de sinais moderno, fornecendo ferramentas para investigar a assinatura espectral dos dados medidos (Oppenheim; Schafer, 2010).

Em estudos experimentais, os dados são comumente adquiridos como séries temporais discretas. Embora a representação no domínio do tempo preserve a evolução temporal do sinal, esta nem sempre é capaz de fornecer uma identificação clara de frequências características associadas a fenômenos físicos pouco evidentes. Uma representação no domínio da frequência é, então, muitas vezes adequada para analisar processos oscilatórios e identificar componentes espectrais dominantes (Bendat; Piersol, 1986).

Para sinais discretos, o conteúdo da frequência pode ser obtido através da Transformada Discreta de Fourier (DFT), que decompõe uma sequência finita de amo-

tras em uma série de componentes harmônicos distribuídos sobre uma faixa de frequência. Matematicamente, a DFT de uma sequência temporal $x[n]$ com N amostras pode ser expressa como

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad (6)$$

em que $X[k]$ representa a amplitude complexa associada à frequência discreta k , j é a unidade imaginária e N corresponde ao número de amostras do sinal (Oppenheim; Schafer, 2010). De uma perspectiva física, a transformada pode ser interpretada como uma mudança na representação, em que o sinal não mais é descrito pela sua variação no tempo, mas sim pela contribuição relativa de cada frequência para aquele intervalo (Rao *et al.*, 2010).

A aplicação prática da DFT foi amplamente expandida com o desenvolvimento do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Introduzida por Cooley e Tukey (1965), a FFT fornece um procedimento eficiente para computar a DFT, reduzindo significativamente o custo computacional para análises espectrais e permitindo o processamento de um volume elevado de dados. Esse avanço estabeleceu a FFT como uma das ferramentas mais importantes do processamento digital de sinais, sendo amplamente empregada na análise espectral de dados experimentais e na identificação de frequências dominantes associadas a diferentes fenômenos físicos (Oppenheim; Schafer, 2010).

2.4.2 Densidade Espectral de Potência

Embora a Transformada de Fourier permita identificar as frequências presentes em um sinal, muitas aplicações experimentais envolvem processos aleatórios cujas amplitudes apresentam variações estatísticas ao longo do tempo. Nesses casos, torna-se conveniente analisar não apenas a presença de determinadas frequências, mas também a forma como a energia do sinal se distribui ao longo do espectro. Essa informação é fornecida pela Densidade Espectral de Potência (PSD), amplamente empregada em estudos de vibrações, turbulência e aeroacústica (Bendat; Piersol, 1986; Oppenheim; Schafer, 2010).

A PSD representa a distribuição da potência média de um sinal em função da frequência, permitindo identificar bandas espectrais dominantes e comparar quantitativamente diferentes condições de operação. Em problemas aeroacústicos, essa representação é particularmente útil para investigar mecanismos de geração de ruído e caracterizar a contribuição de diferentes escalas do escoamento para o espectro acústico medido.

Na prática, a PSD raramente é obtida diretamente a partir de uma única Transformada de Fourier. Uma abordagem amplamente utilizada consiste no método pro-

posto por Welch (1967), no qual o sinal é dividido em segmentos menores, os espectros de cada segmento são calculados individualmente e, posteriormente, calculada a média desses espectros. Esse procedimento reduz a variância da estimativa espectral em comparação com a utilização de um único periodograma, produzindo espectros mais estáveis e adequados para análise de sinais experimentais. O método de Welch tornou-se uma das técnicas mais difundidas para estimação de PSD e é amplamente empregado em aplicações de processamento digital de sinais e aeroacústica.

2.4.3 Decomposição Ortogonal Própria (POD)

A POD foi proposta inicialmente por Lumley (1967) como um método de extrair estruturas coerentes de grande escala de escoamentos turbulentos, cujo ponto forte se encontra na capacidade de representar qualquer tipo de dado em uma base ortonormal otimizada. Com a introdução de métodos mais avançados de POD, como o *método dos snapshots*, tornou-se possível lidar com problemas bem mais complexos, incluindo soluções em reconhecimento facial, análise de sinais e compressão de dados (Andrews *et al.*, 1967).

No que se diz respeito à mecânica dos fluidos, a POD permitiu decompor escoamentos turbulentos em análises pontuais de camadas limites, desprendimentos de vórtices e escoamentos cisalhantes (Berkooz *et al.*, 1993). Quando aplicado às equações de Navier-Stokes, um determinado número de modos POD pode reduzir a complexidade das equações diferenciais de um sistema e investigar estruturas antes não evidenciadas (Ukeiley, 1995).

O método snapshot, introduzido por Sirovich (1987), é uma versão computacionalmente eficiente da POD, especialmente útil quando o número de amostras temporais (snapshots) é muito menor que o número de pontos espaciais do campo de dados. Em vez de resolver diretamente o problema de autovalores em uma matriz de covariância de grande dimensão espacial, o método opera sobre a matriz temporal construída a partir dos snapshots, reduzindo significativamente o custo computacional (Li; Zhang, 2016).

Seja $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t_i)$ o campo vetorial de velocidade medidos (ou simulados) em diferentes instantes t_i , com $i = 1, 2, \dots, N$, o método dos snapshots considera que cada um desses campos pode ser projetado em uma base ortonormal de funções espaciais $\phi_k(\mathbf{x})$, de modo que

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t_i) = \sum_{k=1}^N a_k(t_i) \phi_k(\mathbf{x}), \quad (7)$$

O procedimento consiste em construir uma matriz $\mathbf{U}$, cujas colunas são os snapshots $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t_i)$, e, em seguida, resolver o problema dos autovalores para a matriz de correlação temporal dada por

$$\mathbf{C} = \frac{1}{m-1} \mathbf{U} \mathbf{U}^T, \quad (8)$$

onde $\mathbf{C}$ é a matriz de correlação temporal, $\mathbf{U}$ contém os snapshots e m corresponde ao número de snapshots utilizados na análise.

Resolve-se o problema de autovalores para obter os modos temporais (auto-vetores),

$$\mathbf{C} \mathbf{A} = \lambda \mathbf{A}, \quad (9)$$

onde λ representa os autovalores da matriz de correlação e as colunas de $\mathbf{A}$ correspondem aos respectivos autovetores.

Os coeficientes espaciais são então calculados por

$$\Phi = \mathbf{U}^T \mathbf{A}, \quad (10)$$

onde Φ contém os modos espaciais da decomposição.

Finalmente, a reconstrução do campo utilizando os primeiros k modos é dada por

$$\mathbf{U}_k(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^k A_i(t) \Phi_i(\mathbf{x}). \quad (11)$$

2.4.4 Decomposição Ortogonal Própria Espectral (SPOD)

Avançando na análise das estruturas coerentes do escoamento, outra ferramenta capaz de identificar fenômenos significativos na região do slat é a Decomposição Ortogonal Própria Espectral. Sua implementação, lógica e cálculo são bastante semelhantes aos da POD; entretanto, em vez de operar diretamente no domínio do tempo, o conjunto de dados é analisado no domínio da frequência. Essa abordagem permite separar estruturas coerentes associadas a diferentes escalas temporais do escoamento, fornecendo uma descrição mais detalhada dos fenômenos presentes nos dados (Schmidt; Colonius, 2020).

A SPOD pode ser interpretada como uma extensão da POD para processos estatisticamente estacionários, isto é, situações em que as propriedades estatísticas globais do escoamento permanecem aproximadamente constantes ao longo do tempo. Enquanto a POD convencional identifica estruturas energéticas dominantes considerando todo o conjunto temporal de dados, a SPOD realiza a decomposição individualmente para cada frequência discretizada. Como consequência, os modos obtidos apresentam coerência espacial e temporal simultaneamente, facilitando sua interpretação física e sua associação a mecanismos específicos do escoamento,

como instabilidades hidrodinâmicas, desprendimento de vórtices e fenômenos aeroacústicos (Schmidt; Colonius, 2020). Matematicamente, os modos SPOD são obtidos a partir da decomposição da densidade espectral cruzada (CSD), definida por

$$S(\mathbf{x}, \mathbf{x}', f) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (12)$$

em que $C(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \tau)$ representa a função de correlação espacial-temporal e f corresponde à frequência de análise (Schmidt; Colonius, 2020).

Para uma frequência selecionada, a SPOD retorna um conjunto de modos ordenados por energia, do mais energético ao menos energético, de acordo com seus autovalores associados. Dessa forma, a distribuição dos autovalores fornece uma indicação da importância relativa de cada estrutura coerente para a dinâmica do escoamento. Em particular, uma grande separação entre os autovalores dos primeiros modos pode indicar a predominância de um único mecanismo físico naquela frequência, enquanto distribuições mais uniformes sugerem a contribuição simultânea de múltiplas estruturas coerentes (Schmidt; Colonius, 2020).

2.4.5 Identificação e Rastreo de vórtices

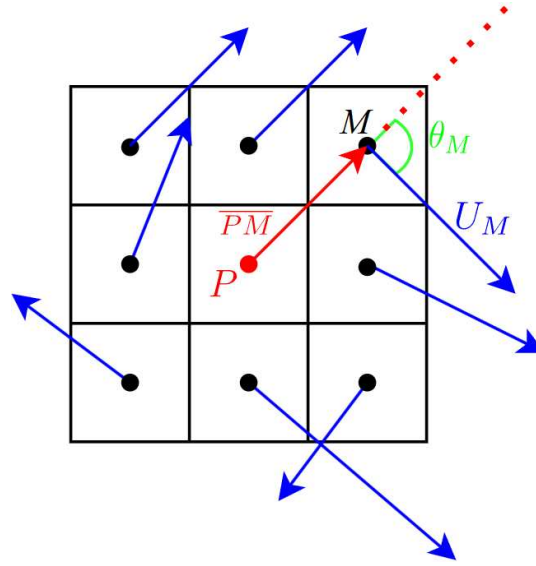
A vorticidade é um conceito fundamental para a análise de escoamentos turbulentos. Diversos critérios foram propostos para identificar e quantificar estruturas vorticosas, como os critérios Q e λ_2 . Mais recentemente, as funções Γ_1 e Γ_2 têm sido aplicadas com sucesso devido à sua simplicidade e clareza na representação de regiões vorticosas (Graftieaux *et al.*, 2001). A função Γ_1 é definida a partir de vetores de velocidade localizados em uma vizinhança S ao redor de um ponto de interesse P . O tamanho dessa janela afeta a sensibilidade da análise e consiste em N pontos discretos (M_i) correspondentes aos centros das células da malha. A função calcula uma média ponderada do produto vetorial entre o vetor posição $\overline{PM}$ e o vetor velocidade $\mathbf{U}_M$ no ponto M ,

$$\Gamma_1(P) = \frac{1}{S} \int_S \sin(\theta_M) = \frac{1}{N} \sum \sin(\theta_M), \quad (13)$$

em que θ_M é o ângulo entre os vetores $\overline{PM}$ e $\mathbf{U}_M$, conforme ilustrado na Figura 5. A função Γ_1 fornece valores normalizados entre -1 e $+1$, indicando a probabilidade de o ponto P corresponder ao centro de um vórtice.

A função Γ_2 segue um princípio semelhante, porém subtrai a velocidade média espacial dentro da janela S de cada vetor velocidade antes do cálculo. Esse ajuste confere à função Γ_2 a característica de invariância de Galileu, ou seja, a análise passa a ser independente do movimento global do escoamento. Além disso, um limiar para Γ_2 ($|\Gamma_2| > \frac{2}{\pi}$) é estabelecido para detectar regiões onde a rotação predomina sobre os efeitos de cisalhamento ou estiramento, permitindo estimar o raio dos vórtices. Uma

Figura 5 – Esquema das variáveis da função Γ_1



Fonte: Autor (2026).

análise mais aprofundada de pontos críticos, como nós e pontos de sela, é explorada por Depardon *et al.* (2006), auxiliando na interpretação da topologia local do escoamento.

2.4.6 Correlação Cruzada

A correlação cruzada foi primeiramente proposta como uma ferramenta estatística utilizada para quantificar o grau de similaridade entre dois sinais em função de um deslocamento temporal ou espacial. Em análise de escoamentos turbulentos, permite investigar a coerência entre estruturas espaciais em diferentes localizações ou entre sinais temporais obtidos em diferentes posições do campo de medição (Rackl; Siddon, 1979).

Para isso, a correlação é calculada como função de um atraso temporal τ , permitindo avaliar a relação entre os sinais para diferentes defasagens temporais e identificar a defasagem para a qual a correlação é máxima. O valor de τ associado ao máximo da correlação pode então ser utilizado para identificar a defasagem predominante entre os fenômenos observados. A função de correlação $S_{\phi,p}$ é calculada entre as flutuações dos campos de velocidade U e V , aqui denotados como a grandeza ϕ' , obtidos através da PIV e dos dados acústicos de pressão p' dos microfones e é definida como

$$S_{\phi'p'}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [\phi'(\mathbf{x}, t_n) p'(\mathbf{y}, t_n + \tau)], \quad (14)$$

onde $\mathbf{x}$ e t_n representam, respectivamente, a posição e o instante de tempo da velocidade medida e $\mathbf{y}$ a posição do microfone. τ simboliza a variável de atraso temporal utilizada para avaliar a correlação em diferentes defasagens e N a quantidade de amostras PIV.

É possível também exprimir um coeficiente de correlação normalizado $R_{\phi',p'}$ utilizando os valores de desvio padrão de cada uma das grandezas,

$$R_{\phi'p'}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \tau) = \frac{S_{\phi'p'}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \tau)}{\sigma_{\phi'}(\mathbf{x}) \sigma_{p'}} \quad (15)$$

em que $\sigma_{\phi'}(\mathbf{x})$ e $\sigma_{p'}$ representam, respectivamente, o desvio padrão dos dados de velocidade e de pressão. Vale ressaltar que, na Equação 15, para os campos PIV, cada ponto no espaço possuirá um valor distinto de $\sigma_{\phi'}$, enquanto o valor de $\sigma_{p'}$ é constante para determinado microfone.

Quando $R_{\phi'p'}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \tau)$ atinge seu valor máximo, identifica-se a defasagem temporal para a qual os sinais de velocidade e pressão apresentam o maior grau de correlação.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia experimental adotada para a investigação aeroacústica de um perfil de asa equipado com slat em túnel de vento. São descritos o ambiente experimental, o modelo ensaiado, os sistemas de medição empregados e os procedimentos utilizados para a aquisição. Além dos princípios gerais de operação já apresentados na fundamentação teórica, são detalhadas as características dos instrumentos utilizados, suas configurações de operação e os parâmetros experimentais adotados. Os experimentos foram conduzidos nas instalações do Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA) da École Centrale de Lyon, entre 2023 e 2025. Toda a campanha experimental, incluindo a montagem da instalação e a realização dos ensaios, antecede este trabalho e foi conduzida pela equipe do laboratório. Todas as rotinas de processamento deste trabalho foram desenvolvidas ou implementadas em ambiente MATLAB, abrangendo análises espectrais, decomposições modais, rastreamento de estruturas vorticais e correlações entre grandezas aerodinâmicas e acústicas.

3.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

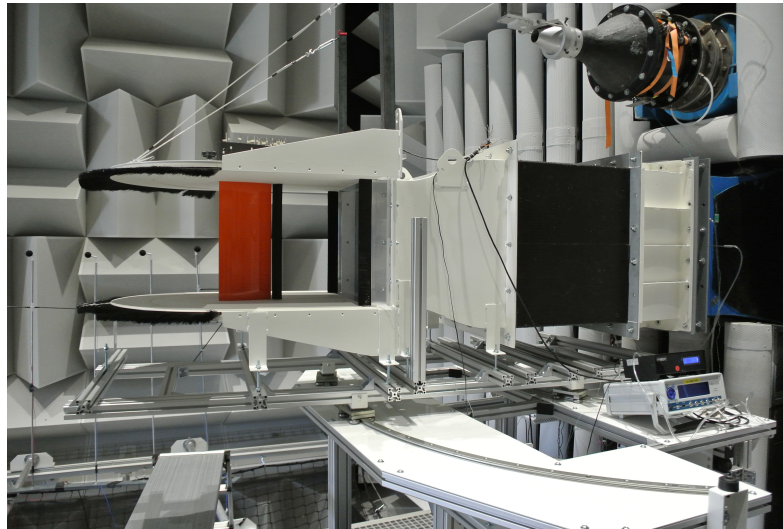
Os dados analisados neste trabalho foram obtidos em campanhas experimentais realizadas no túnel de vento anecóico do LMFA na École Centrale de Lyon, que acopla linhas de fornecimento de ar subsônico e supersônico a uma câmara anecoica de $10 \times 8 \times 8$ m. Um ventilador de dois estágios, com potência de 800 kW, fornece velocidades de escoamentos correspondentes a números de Mach de até 0,8 para a configuração subsônica, por meio de dutos silenciados, de modo que o ruído de fundo é mantido em níveis mínimos.

O duto de saída do túnel de vento possui seção transversal quadrada com lado de 0,56 m. Para este experimento, foi instalado um bocal convergente, reduzindo o escoamento para uma seção retangular de 0,50 m de largura e 0,40 m de altura. Além disso, para suprimir ruídos parasitas em baixas frequências, foram instaladas escovas ao longo das bordas a jusante das placas. Uma fotografia da configuração experimental é apresentada na Figura 6.

3.2 GEOMETRIA DO PERFIL TESTADO

Os experimentos foram realizados num aerofólio F16, do Centro Aeroespacial Alemão (DLR), adaptado a partir da configuração de três elementos, contendo o slat, a asa principal e o flap, para uma de dois elementos, em que o flap foi retirado a fim de isolar os efeitos gerados pelo slat. A Figura 7 demonstra um esquema do

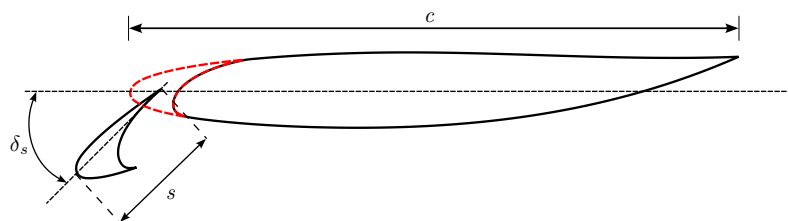
Figura 6 – Fotografia da configuração experimental ilustrando o bocal convergente, o aerofólio (laranja) e o slat (preto). Alguns microfones de diretividade são visíveis ao fundo.



Fonte: Autor (2026).

modelo bidimensional, que possui corda em sua posição retraída de $c = 0,200$ m e envergadura de $0,400$ m; a corda do slat é de $c_s = 0,186 c = 0,0372$ m e está fixada a um ângulo de deflexão de $\delta_s = 28,814^\circ$. Mais detalhes sobre a geometria podem ser encontrados em Terracol *et al.* (2016). O conjunto é montado entre placas horizontais paralelas com um disco giratório no meio, onde tanto o slat quanto a asa principal são fixos. O DLR tem utilizado esse aerofólio extensivamente, construindo diversos modelos geometricamente semelhantes em diferentes escalas (Wild *et al.*, 2006).

Figura 7 – Modelo de dois elementos usado no estudo. A linha vermelha tracejada representa a configuração retraída



Fonte: Autor (2026).

As medições foram realizadas para três velocidades de escoamento livre, correspondentes a 25, 50 e 75 m/s. Para cada condição de ensaio foram realizadas múltiplas execuções independentes sob as mesmas condições experimentais, permitindo avaliar a repetibilidade das medições e aumentar a robustez estatística dos resultados. Foram adquiridas cinco execuções para as velocidades de 25 e 75 m/s e dez execuções para a velocidade de 50 m/s. Os valores das velocidades nomi-

nais de escoamento livre e seus respectivos números de Reynolds são apresentados na Tabela 1, utilizando a corda do elemento principal retraído, c , como comprimento característico na definição do número de Reynolds.

Tabela 1 – Velocidades de escoamento e respectivos números de Reynolds baseados na corda do aerofólio.

U_{∞} [m/s]	Re_c
25	$3,38 \times 10^5$
50	$6,77 \times 10^5$
75	$1,01 \times 10^6$

Com o objetivo de caracterizar a qualidade do escoamento incidente na seção de testes, foram realizadas medições por anemometria de fio quente na saída do convergente do túnel de vento. Essa técnica baseia-se na variação da transferência de calor entre um filamento aquecido eletricamente e o escoamento, permitindo a obtenção de medições de velocidade com elevada resolução temporal (Bruun, 1995). Foi utilizada uma sonda Dantec 55P01, composta por um filamento reto de 1,25 mm de comprimento e 5 μ m de diâmetro, operada em modo de temperatura constante por meio de um módulo Dantec StreamLine Pro 90C10. Os sinais foram adquiridos utilizando um sistema National Instruments PXI-4472 com frequência de amostragem de 104 kHz.

A calibração da sonda foi realizada em relação a um tubo de Pitot posicionado no núcleo do escoamento, sendo empregada uma curva de ajuste polinomial de quarta ordem para a conversão da tensão elétrica em velocidade. Os dados obtidos foram utilizados para determinar a velocidade média e a intensidade de turbulência na saída do convergente, permitindo avaliar as condições do escoamento incidente sobre o modelo ensaiado.

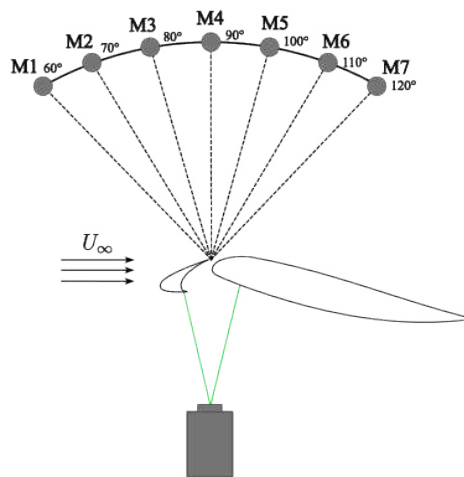
3.3 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

3.3.1 Aquisição acústica

Para as medições acústicas, um arranjo em arco de circunferência de sete microfones GRAS 46BE 1/4", cada um com sensibilidade de aproximadamente 3,6 mV/Pa e resposta em frequência entre 4 Hz e 80 kHz, foi instalado, de ambos os lados, próximo à saída convergente. Tanto para as medições voltadas para o extradorso quanto para o intradorso, o arranjo foi posicionado de modo que o microfone central (M4, sendo a referência de 90°) ficasse perpendicular ao escoamento e alinhado ao bordo de fuga do slat, a uma distância de 2 m. Os seis microfones restantes são espaçados em incrementos de 10°, três para o sentido horário e três para o sentido anti-horário,

conforme ilustrado na Figura 8. Cabe destacar que as medições acústicas e de velocidade foram realizadas alternadamente, uma vez que não é possível instalar a PIV e os microfones do mesmo lado simultaneamente. A figura mostra a aquisição PIV no lado do intradorso do escoamento, enquanto os dados acústicos foram registrados no lado do extradorso; a configuração foi, então, invertida para as execuções subsequentes.

Figura 8 – Conjunto de microfones e sistema de PIV montados simultaneamente



Fonte: Autor (2026).

Os sinais acústicos adquiridos pelos microfones foram armazenados na forma de séries temporais discretas e posteriormente disponibilizados para pósprocessamento. Cada execução possuía duração de 60 s e foi adquirida com frequência de amostragem de 102,4 kHz. Os sinais foram convertidos de tensão elétrica para pressão acústica utilizando os valores de sensibilidade individuais de cada microfone fornecidos durante a calibração do sistema.

O pós-processamento dos sinais foi realizado em ambiente MATLAB, sendo empregados procedimentos de análise espectral para obtenção das densidades espectrais de potência e comparação entre as diferentes condições de escoamento. Os parâmetros utilizados na estimação espectral são apresentados na Seção 3.4.

Além do arranjo de microfones, foi utilizada uma câmera (ou antena) acústica LMS Sound Camera Digital Array para localizar as fontes de ruído e visualizar sua distribuição espacial sobre a superfície do elemento. A antena consiste em 117 sensores MEMS (Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos) dispostos em uma configuração espiral, contendo 9 braços radiais, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Câmera acústica.



Fonte: Autor (2026).

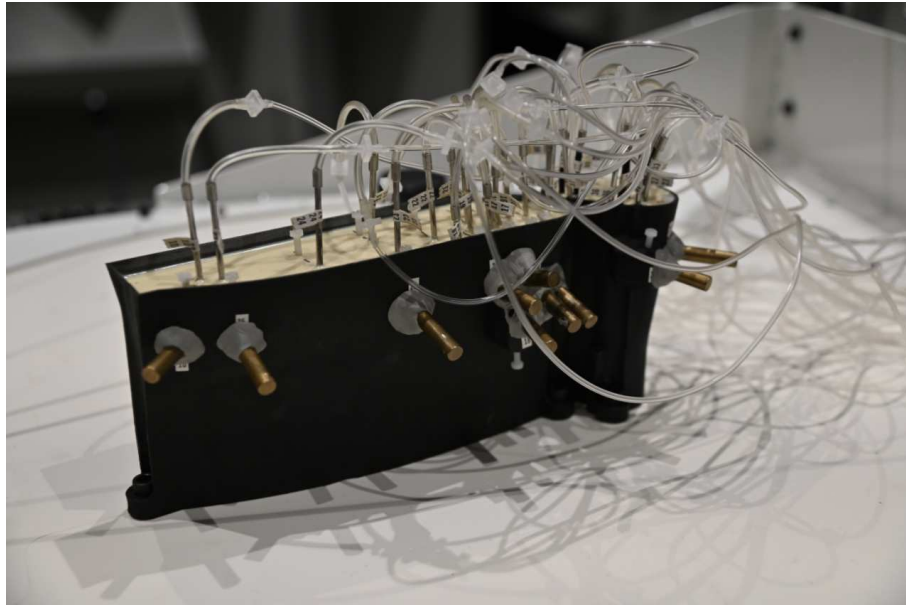
3.3.2 Medições de pressão

A asa e o slat possuem canais internos extremamente finos que atravessam o sólido e possibilitam a tomada de pressão na parede do plano médio da envergadura. A localização dos pontos de aquisição de pressão é mostrada na Figura 12. Valores de pressão estática foram registrados com captorees Kulite KMPS-1-64-XX-Y Series, com faixa de pressão de até 1 (6884 Pa) e precisão de até 0,12 % desse valor. Os valores de flutuação de pressão instável foram adquiridos através de microfones embutidos de 1/4" do Tipo 4958 da Brüel & Kjær, com sensibilidade de 11,2 mV/Pa, faixa de frequência entre 10 Hz e 10 kHz e faixa dinâmica de 28 dB a 140 dB.

A Figura 10 ilustra a região superior do elemento de asa, no exterior da saída convergente. Os canais transparentes visíveis na superfície correspondem às tomadas de pressão estática conectadas aos sensores Kulite, enquanto as sondas destinadas à medição das flutuações de pressão encontram-se instaladas na lateral do perfil. Na configuração mostrada, os elementos cilíndricos dourados correspondem a tampões metálicos utilizados para isolar as tomadas de flutuação de pressão, permitindo a realização exclusiva das medições de pressão estática. Quando necessário, esses tampões são substituídos por microfones Brüel & Kjær, possibilitando a aquisição simultânea da pressão estática pelos sensores Kulite e das flutuações de pressão pelos microfones.

Um esquema do sistema de aquisição é apresentado na Figura 11, na qual a seta vermelha indica o caminho da pressão estática até os respectivos sensores e a seta azul representa a conexão com os microfones destinados à medição das flutuações de pressão.

Figura 10 – Captadores de pressão instalados sobre o elemento da asa



Fonte: Autor (2026).

Para os sinais de pressão flutuante, foi estabelecida uma função de resposta em frequência (FRF) para corrigir a atenuação e a defasagem de fase introduzidas pela tubulação. A compensação, previamente aplicada pela equipe do LMFA, empregou parâmetros calculados a partir dos espectros medidos, seguindo o procedimento detalhado por Leclère *et al.* (2016).

3.3.3 Coeficiente de pressão

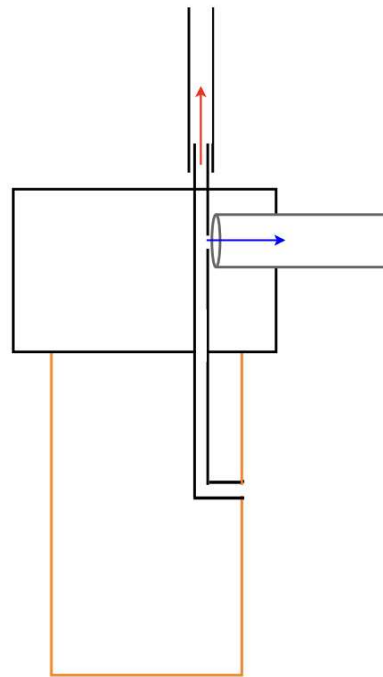
A partir dos dados de pressão estática, é possível determinar a distribuição do coeficiente de pressão ao longo da corda do aerofólio. A adimensionalização dos valores de pressão permite a comparação direta entre diferentes configurações de escoamentos e é definida por Anderson (2007) como

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty}, \quad (16)$$

em que p é o valor da pressão estática local, p_∞ é a pressão estática do escoamento livre, neste caso adotada a pressão atmosférica, adquirida através de manômetro, e q_∞ é a pressão dinâmica do escoamento livre, adquirida através de um tubo de Pitot instalado na saída do convergente.

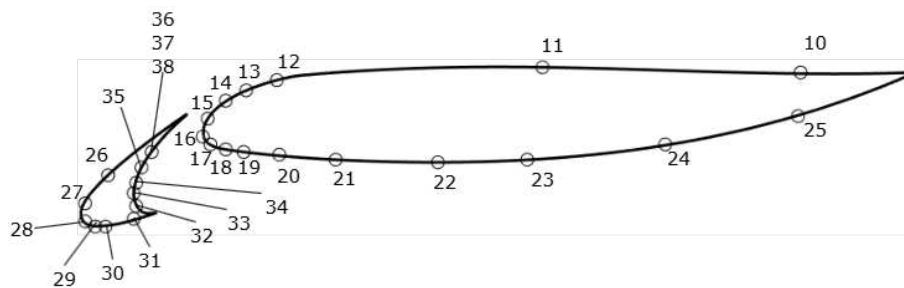
Para todas as condições analisadas, adotou-se $p_\infty = 99378$ Pa. Os parâmetros do escoamento livre foram determinados a partir das medições de temperatura, pressão atmosférica e pressão dinâmica realizadas durante a campanha experimental. A densidade do ar foi calculada pela equação dos gases ideais, definida como

Figura 11 – Esquema do sistema de aquisição de pressão estática e flutuações de pressão



Fonte: Autor (2026).

Figura 12 – Posições dos canais de tomada de pressão



Fonte: Autor (2026).

$$\rho_{\infty} = \frac{p_{\infty}}{RT_{\infty}}, \quad (17)$$

onde $R = 287,04 \text{ J/(kg K)}$ é a constante específica do gás para o ar e T_{∞} a temperatura do escoamento livre. A velocidade do escoamento livre foi obtida a partir da definição de pressão dinâmica,

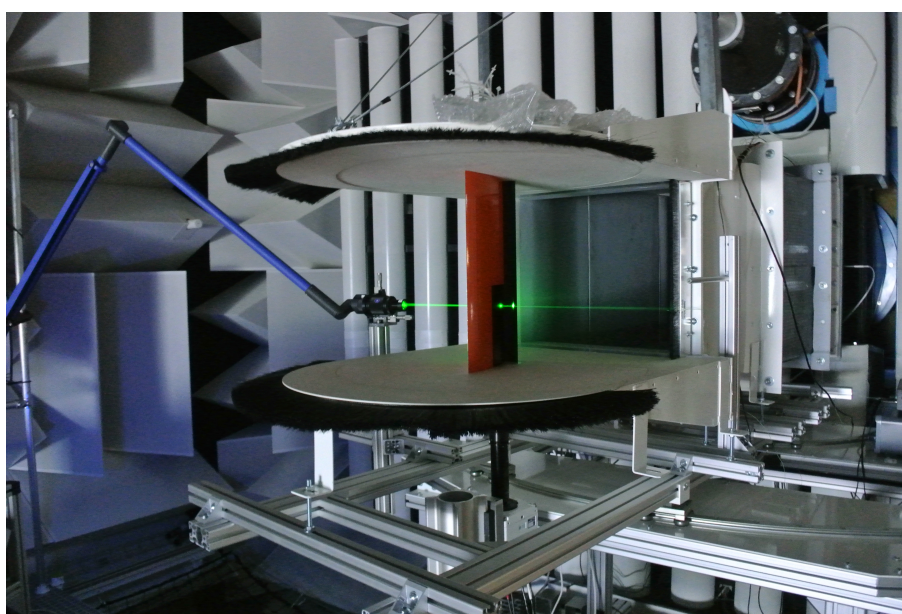
$$U_{\infty} = \sqrt{\frac{2q_{\infty}}{\rho_{\infty}}}, \quad (18)$$

conforme apresentado por Anderson (2007).

3.3.4 Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)

Nesta campanha, foi realizada a PIV bidimensional com resolução temporal (2D TR-PIV) aproximadamente no plano médio da envergadura do aerofólio. A configuração do sistema é mostrada na Figura 13, que ilustra o braço articulado usado para guiar o feixe de laser PIV até a região de interesse. A câmera foi posicionada sob a placa inferior e as imagens são capturadas através de um orifício vedado por uma placa de acrílico transparente. Toda a montagem experimental e a realização dos ensaios descritas nesta seção foram previamente conduzidas pela equipe do LMFA.

Figura 13 – Setup do PIV



Fonte: LMFA (2023).

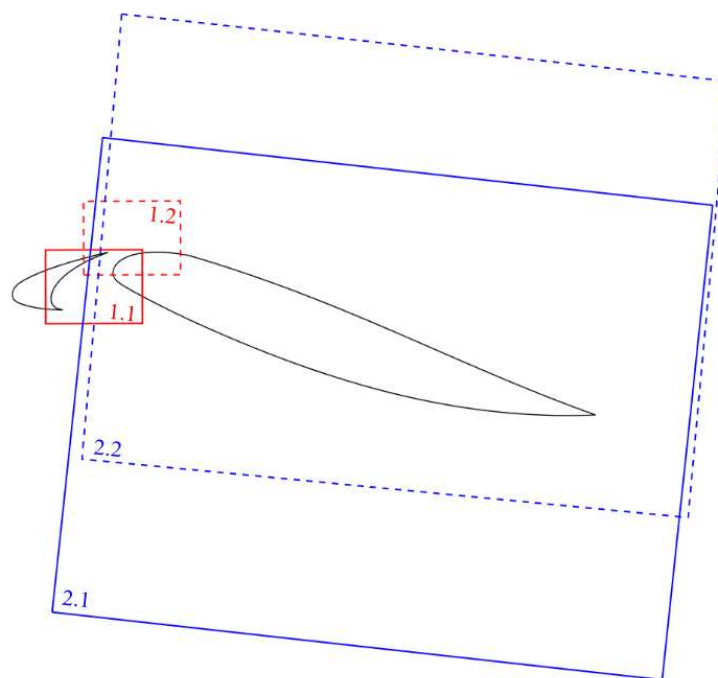
O escoamento foi semeado com partículas do fluido de fumaça Feuerwehr Extra SAFEX Inside, com diâmetro médio de aproximadamente $1,0\ \mu\text{m}$. Essas partículas foram injetadas na entrada do compressor, a montante da seção de teste, permitindo que se dispersassem homogeneamente pelo escoamento. A caracterização do tamanho das partículas, realizada por Anemometria Doppler de Fase (PDA), revelou uma distribuição variando de $0,514\ \mu\text{m}$ a $3,0\ \mu\text{m}$, com média próxima a $1,0\ \mu\text{m}$. Isso garantiu que as partículas seguissem o escoamento de forma eficaz e fossem distribuídas uniformemente.

A iluminação foi fornecida por um laser de pulso duplo Mesa PIV 532-120-M (Amplitude Laser®), emitindo a $532\ \text{nm}$ com energia de $9\ \text{mJ}$ por pulso. O feixe foi direcionado por um braço articulado e as medições do campo de velocidade foram capturadas em um campo de visão de $166,8 \times 222,0\ \text{mm}^2$, com resolução espacial de $5,76\ \text{px/mm}$. A aquisição e o processamento dos dados foram realizados com o software Davis 10.1.2 (LaVision).

A PIV foi medida a uma frequência de $f_s = 5,0$ kHz, com duração de aquisição de 0,98 s, totalizando 4900 imagens por execução. Um sistema de gatilho foi configurado para garantir que todas as imagens fossem registradas no mesmo intervalo de tempo das medições acústicas, permitindo sincronização precisa entre os dados acústicos e de PIV. Os vetores de velocidade foram obtidos por correlação cruzada com uma janela de interrogação final de 12×12 px² e sobreposição de 50%. O pós-processamento incluiu o uso de razão de pico e filtros de limiar residual para remover vetores inconsistentes. Mais detalhes sobre o algoritmo e seus parâmetros podem ser encontrados em Raffel *et al.* (2007).

Quatro regiões de interesse distintas foram visadas nas medições de PIV: a cavidade do slat, o bordo de fuga do slat, o extradorso completo do elemento principal (asa) e seu intradorso. O esquema para essa configuração é mostrado na Figura 14, onde as regiões 1.1 e 1.2 representam o slat em detalhes e 2.1 e 2.2 as regiões globais do perfil de asa.

Figura 14 – Regiões de interesse do PIV



Fonte: Autor (2026).

Após o processamento inicial realizado no software Davis 10.1.2, os resultados foram disponibilizados na forma de arquivos .dat, contendo os campos instantâneos de velocidade para cada instante de aquisição. Para cada execução foram gerados 4900 arquivos, correspondentes aos 4900 instantes amostrados durante a aquisição. Cada arquivo continha informações de uma malha com 34240 pontos espaciais, organizada em 214 pontos na direção horizontal e 160 pontos na direção

vertical. Para cada ponto da malha eram fornecidas as coordenadas espaciais (x, y) , as componentes horizontal (U) e vertical (V) da velocidade, o módulo da velocidade ($|\mathbf{V}|$), a vorticidade (ω) e uma variável binária de validade (*isValid*).

Os dados foram importados para o MATLAB, onde os vetores unidimensionais fornecidos pelo software foram reorganizados em matrizes bidimensionais representando os campos espaciais instantâneos. A variável *isValid* foi utilizada como máscara para identificar regiões sem informação válida, incluindo áreas ocupadas pelo sólido, regiões fora da janela de aquisição e zonas de sombra do laser. A partir dessa reconstrução dos campos bidimensionais foram realizadas as análises subsequentes, incluindo o cálculo de campos médios, visualização de linhas de corrente, decomposição modal por POD e SPOD, identificação de vórtices e correlação cruzada entre os dados aerodinâmicos e acústicos.

3.4 PÓS-PROCESSAMENTO DOS DADOS

3.4.1 Aplicação da POD aos campos PIV

A Decomposição Ortogonal Própria foi aplicada aos campos instantâneos de velocidade obtidos por PIV, utilizando separadamente cada uma das execuções disponíveis para uma mesma condição de escoamento. Cada execução continha 4900 snapshots adquiridos a uma frequência de 5 kHz, correspondendo aos campos bidimensionais das componentes horizontal (U) e vertical (V) da velocidade.

Inicialmente, a máscara de validade fornecida pelo processamento PIV (*isValid*) foi utilizada para remover pontos sem informação física representativa do escoamento, possibilitando a utilização apenas dos pontos contendo informações do escoamento. Adicionalmente, foi aplicada uma operação de erosão morfológica sobre a máscara bidimensional com o objetivo de remover pontos muito próximos às paredes do domínio, reduzindo a influência de regiões potencialmente afetadas por incertezas associadas ao processamento PIV.

Após a aplicação da máscara, as componentes U e V foram reorganizadas em vetores unidimensionais e concatenadas em um único vetor de estado, permitindo que ambas contribuíssem simultaneamente para a decomposição modal. Em seguida, a média temporal foi removida dos dados, de modo que os modos POD representassem exclusivamente as flutuações do escoamento. A decomposição foi realizada utilizando o método dos snapshots descrito por Sirovich (1987), obtendo-se os modos espaciais, os coeficientes temporais e os autovalores associados a cada modo. Os autovalores foram posteriormente utilizados para quantificar a contribuição energética relativa de cada estrutura coerente identificada.

Além disso, uma das principais vantagens da POD consiste na possibilidade de reconstruir o campo de escoamento utilizando apenas um subconjunto dos modos

obtidos na decomposição. Como os primeiros modos concentram a maior parcela da energia do sistema, a reconstrução permite preservar as estruturas mais organizadas do escoamento ao mesmo tempo em que reduz a influência de flutuações menos energéticas e de componentes associadas ao ruído experimental (Li; Zhang, 2016).

Neste trabalho, os campos reconstruídos foram obtidos pela recomposição dos modos selecionados juntamente com a velocidade média previamente removida durante a etapa de decomposição. Após a reconstrução, a máscara espacial utilizada no pré-processamento foi reaplicada para restaurar a geometria original do domínio e reinserir as regiões sem dados válidos. Os campos reconstruídos foram posteriormente empregados nas análises de identificação e rastreamento de vórtices apresentadas nas seções seguintes.

A definição do número de modos utilizados na reconstrução foi realizada por meio de uma análise de correlação entre execuções independentes submetidas à mesma condição de escoamento. Seguindo a abordagem proposta por Butcher e Spencer (2019), os modos espaciais obtidos em diferentes execuções foram comparados entre si com o objetivo de avaliar a repetibilidade das estruturas identificadas pela POD. Os modos espaciais foram previamente normalizados e a correlação foi avaliada a partir do valor absoluto do coeficiente obtido. Essa abordagem evita reduções artificiais da correlação associadas a inversões de sinal entre modos equivalentes, uma vez que a orientação dos autovetores da POD não possui significado físico intrínseco. Para reduzir possíveis efeitos associados a pequenas variações na ordenação modal entre execuções distintas, cada modo foi comparado com seu correspondente direto e com os dois modos imediatamente anteriores e posteriores, totalizando cinco comparações para cada modo. O maior coeficiente de correlação obtido em cada comparação foi então utilizado como medida de similaridade entre os modos.

Embora a seleção modal seja frequentemente realizada a partir de limiares de energia acumulada, tipicamente entre 75% e 90% da energia total, esse procedimento apresenta um grau de arbitrariedade e não garante que estruturas fisicamente relevantes sejam preservadas (Butcher; Spencer, 2019). Por essa razão, adotou-se neste trabalho um critério baseado na repetibilidade dos modos entre execuções independentes, avaliada por meio de correlação espacial.

Foram analisados múltiplos pares de execuções independentes para cada condição de escoamento, sendo calculada uma curva média de correlação modal. Com base nessa curva, os modos com correlação superior a 80% foram classificados como altamente correlacionados, enquanto modos com correlação inferior a 60% foram considerados não correlacionados. A região intermediária foi classificada como moderadamente correlacionada. Esses limiares foram utilizados para definir os modos de corte empregados nas reconstruções e na identificação das estruturas mais recorrentes do escoamento.

3.4.2 Aplicação da SPOD aos campos PIV

A análise SPOD foi aplicada aos campos instantâneos de velocidade obtidos por PIV, explorando simultaneamente as informações espaciais e temporais presentes nos dados experimentais. O processamento foi realizado utilizando o código em Python desenvolvido e disponibilizado por Guilherme Pick (Silva *et al.*, 2025), baseado na implementação MATLAB fornecida por Schmidt e Colonius (2020), para a obtenção dos modos SPOD.

O conteúdo espectral foi calculado a partir de blocos FFT de 256 amostras utilizando uma janela de Hanning e sobreposição de 50% entre blocos consecutivos. Considerando a frequência de aquisição da PIV de $f_s = 5$ kHz, cada bloco corresponde a uma janela temporal de 0,0512 s, resultando em uma resolução espectral de $\Delta f = 19,53$ Hz. Para cada frequência discretizada, a SPOD fornece um conjunto de modos ordenados de acordo com sua energia associada. Nos resultados apresentados no Capítulo 4, a análise concentra-se em frequências de interesse identificadas a partir dos espectros acústicos e de números de Strouhal reportados na literatura para os mecanismos de escoamento associados ao slat.

3.4.3 Correlação cruzada entre velocidade e pressão acústica

A técnica de correlação cruzada foi aplicada entre os campos de velocidade obtidos por PIV, para as componentes horizontal (U) e vertical (V), e os sinais de pressão medidos pelo microfone M4 do arranjo acústico, adotado como referência. Como os dados de PIV foram adquiridos a 5 kHz e os dados acústicos a 102,4 kHz, o sinal acústico foi subamostrado para 5 kHz de modo a compatibilizar a resolução temporal com as medições de PIV. Essa etapa garantiu compatibilidade entre os conjuntos de dados sem introduzir informações artificiais por meio de interpolação.

Antes do cálculo da correlação, as médias temporais dos sinais de velocidade e pressão foram removidas, de forma que a análise fosse realizada apenas sobre as flutuações das grandezas consideradas. Para cada ponto do domínio PIV, foi então calculado o coeficiente de correlação cruzada normalizado definido na Equação 15, permitindo quantificar a relação entre as flutuações de velocidade e o sinal acústico medido.

O procedimento foi aplicado individualmente a cada uma das cinco execuções independentes disponíveis para uma mesma condição de escoamento. Ao final do processamento, os mapas de correlação obtidos para cada execução foram promediados ponto a ponto, resultando em um mapa médio representativo da condição analisada. Os coeficientes de correlação foram avaliados separadamente para as componentes U e V , possibilitando identificar as regiões do escoamento mais associadas às flutuações de pressão acústica registradas pelo arranjo de microfones.

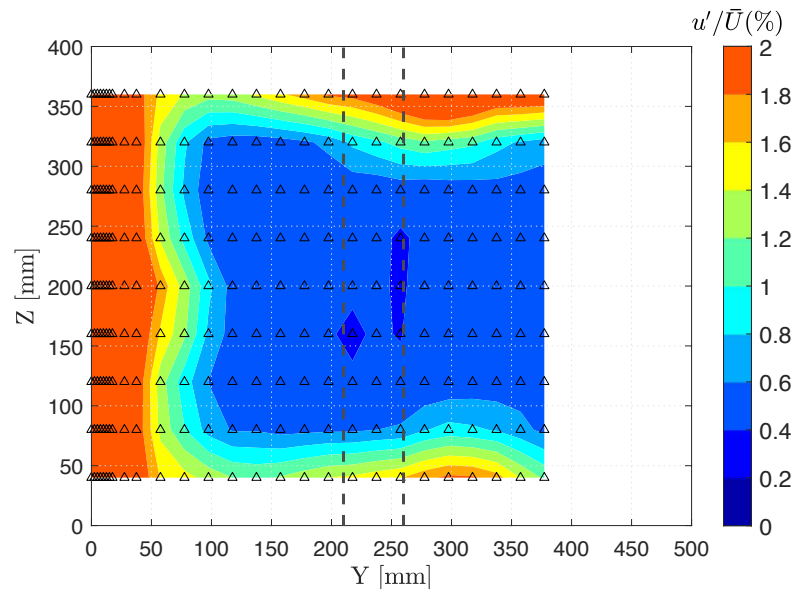
4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os dados acústicos, de pressão e de PIV pós-processados, incluindo campos de velocidade para toda a asa e visualizações detalhadas das principais regiões de interesse, especialmente a cavidade do slat e o vão em direção ao extradorso da asa. Além disso, a POD e a SPOD foram aplicadas aos campos de velocidade para extrair os modos energéticos dominantes e investigar os fenômenos internos e as estruturas coerentes do escoamento. A partir disto, os campos de velocidades puderam ser reconstruídos para aplicar o método de identificação e rastreamento de vórtices a fim de detectar a presença das estruturas geradoras de ruído, sendo esta análise complementada pela correlação cruzada entre os campos de velocidade e pressão acústica.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA SAÍDA DO CONVERGENTE

Para garantir a qualidade do escoamento incidente sobre o modelo, medições com anemometria de fio quente foram realizadas na saída do convergente do túnel de vento antes da instalação da asa. As medições, apresentadas na Figura 15, foram efetuadas para as três velocidades testadas, sem a presença do elemento, e a razão entre as flutuações locais de velocidade (u') e a velocidade média em cada ponto ($\bar{U}$) foi utilizada para avaliar o nível de turbulência. Na figura, o quadro delimita as dimensões reais do convergente, enquanto os triângulos pretos indicam a localização dos pontos de medição de velocidade. Devido à simetria da geometria, as medições foram realizadas apenas em uma porção do convergente, estendendo-se da parede até pouco mais da metade da sua largura.

Figura 15 – Intensidade da turbulência na saída do convergente do túnel de vento, $U_\infty = 50$ m/s



Fonte: Autor (2026).

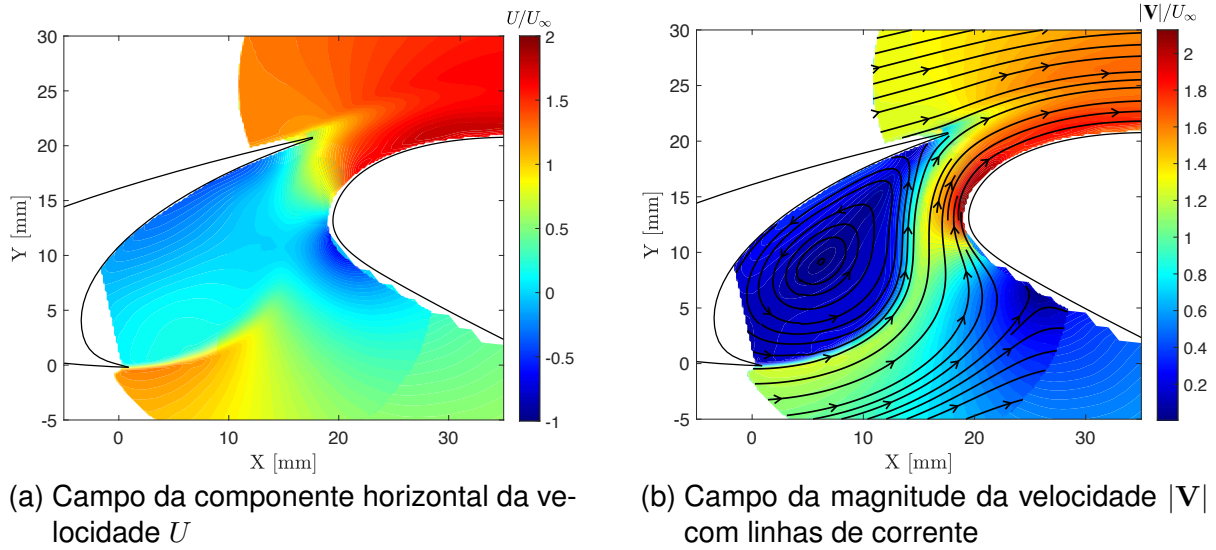
Os maiores valores, em torno de 2%, ocorrem próximos às paredes, enquanto a região central, onde a asa foi montada, apresenta níveis de turbulência significativamente menores, da ordem de 0,4%. As linhas tracejadas verticais indicam a posição do aerofólio em relação à saída do convergente e os triângulos representam os pontos em que as medidas foram realizadas.

Essa análise demonstra que o escoamento incidente sobre a asa é suficientemente laminar para reproduzir de forma confiável condições aerodinâmicas realistas, reduzindo erros experimentais e aumentando a precisão dos resultados.

4.2 RESULTADO DO PÓS-PROCESSAMENTO DAS MEDIÇÕES PIV

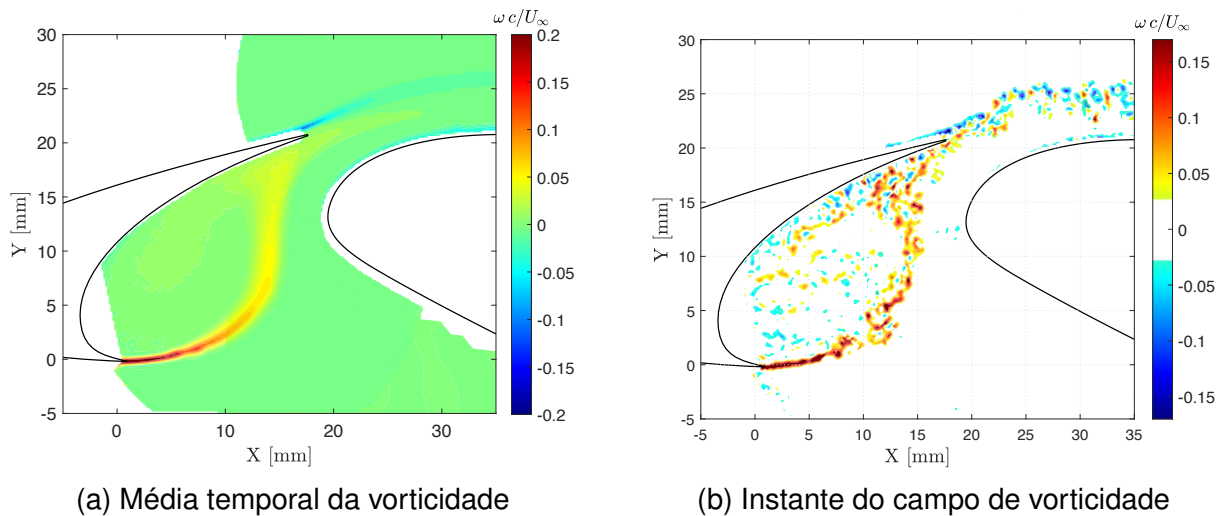
Os dados de PIV foram processados em MATLAB para visualizar as componentes horizontal e vertical da velocidade, sua magnitude, as linhas de corrente correspondentes e o campo de vorticidade a 25, 50 e 75 m/s em um ângulo de ataque de referência de $17,5^\circ$. A Figura 16a apresenta a média temporal da componente horizontal de velocidade (U) das Zonas 1.1 e 1.2 sobrepostas. De forma semelhante, a Figura 16b ilustra a média temporal da magnitude de velocidade ($|V|$) para as mesmas regiões, com as linhas de corrente sobrepostas. As Figuras 17a e 17b apresentam o campo de vorticidade, incluindo respectivamente os resultados da média temporal e de um instante de tempo. Todas as figuras mencionadas correspondem ao escoamento a $U_\infty = 50$ m/s, com a escala de cores normalizada utilizando a corda da asa c como comprimento característico (para a vorticidade) e a velocidade do escoamento livre U_∞ como velocidade de referência.

Figura 16 – Campos médios de velocidade obtidos por PIV na região do slat



Fonte: Autor (2026).

Figura 17 – Comparação entre os campos médio e instantâneo de vorticidade obtidos por PIV



Fonte: Autor (2026).

Os resultados ilustram como as interações entre fluido e superfície influenciam o campo de velocidades ao longo de todo o domínio do escoamento. Próximo ao bordo de ataque do elemento principal da asa, o módulo da velocidade atinge valores de até 1,8 vezes a velocidade nominal do escoamento livre, indicando uma forte aceleração local sobre o extradorso. Esse comportamento é comumente associado a gradientes favoráveis de pressão e à curvatura da superfície, que tendem a guiar e acelerar o escoamento ao longo da superfície do aerofólio.

Na Figura 16b, os valores de magnitude de velocidade evidenciam uma variação acentuada entre a cavidade do slat e o vão estreito em direção ao extradorso

da asa, respectivamente em torno de 0.3 e 1.2 do valor nominal U_∞ . Essa variação abrupta indica a presença de uma camada de cisalhamento que se torna instável ao se desenvolver ao longo do escoamento. O crescimento dessa instabilidade favorece a formação de estruturas de vórtice, também evidenciadas no campo médio de vorticidade apresentado na Figura 17a. A coerência espacial da trajetória de vorticidade reforça ainda mais a presença de um escoamento organizado e não estacionário nessa região.

No interior da cavidade do slat, o padrão das linhas de corrente revela uma grande zona de recirculação, consistente com a separação de escoamento tipicamente observada nessa região. Conforme mostrado em estudos anteriores, como Zhang *et al.* (2024), essa região de recirculação se origina próximo à superfície inferior do slat e é delimitado por uma camada de cisalhamento que pode impactar o elemento principal, amplificando as flutuações locais de velocidade e pressão. Dependendo das condições instantâneas do escoamento, os vórtices da camada de cisalhamento podem permanecer aprisionados dentro da cavidade ou ser ejetados através do vão do slat, influenciando o comportamento do escoamento no extradorso a jusante.

Em suma, dois fenômenos aerodinâmicos principais ocorrem na região do slat: uma região de grande recirculação de baixa frequência no interior da cavidade e a formação de pequenos vórtices na cúspide do slat. Esses vórtices são transportados ao longo da camada de cisalhamento, podendo impactar a superfície principal da asa ou serem ejetados através do vão do slat.

Em conjunto, esses resultados ressaltam a importância do acoplamento entre medições aerodinâmicas e acústicas para caracterizar de forma abrangente os mecanismos de geração de ruído em configurações desse tipo.

4.3 COEFICIENTE DE PRESSÃO

A partir da aquisição dos valores de pressão estática de parede, a distribuição do coeficiente de pressão (C_p) ao longo das superfícies da asa e do slat foi obtida.

Anteriormente, o projeto VALIANT foi conduzido na mesma instalação experimental, utilizando um modelo com uma envergadura de 300 mm e uma corda de 300 mm. Para a campanha MAMBO, utilizada no presente trabalho, a corda foi reduzida para 200 mm e a envergadura aumentada para 400 mm. O novo bocal de saída possui uma seção transversal de 0,5 m de largura e 0,4 m de altura, enquanto o bocal utilizado anteriormente no projeto VALIANT apresentava largura de 0,4 m e altura de 0,3 m. No caso anterior, a combinação de um modelo maior e uma seção de testes menor levou a efeitos de instalação perceptíveis, os quais se esperava mitigar na configuração atual por meio da redução da corda e do aumento da área da seção de testes.

Os valores de temperatura, densidade e pressão dinâmica do escoamento livre para cada velocidade de ensaio são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do escoamento livre utilizados no cálculo do coeficiente de pressão para cada condição de ensaio.

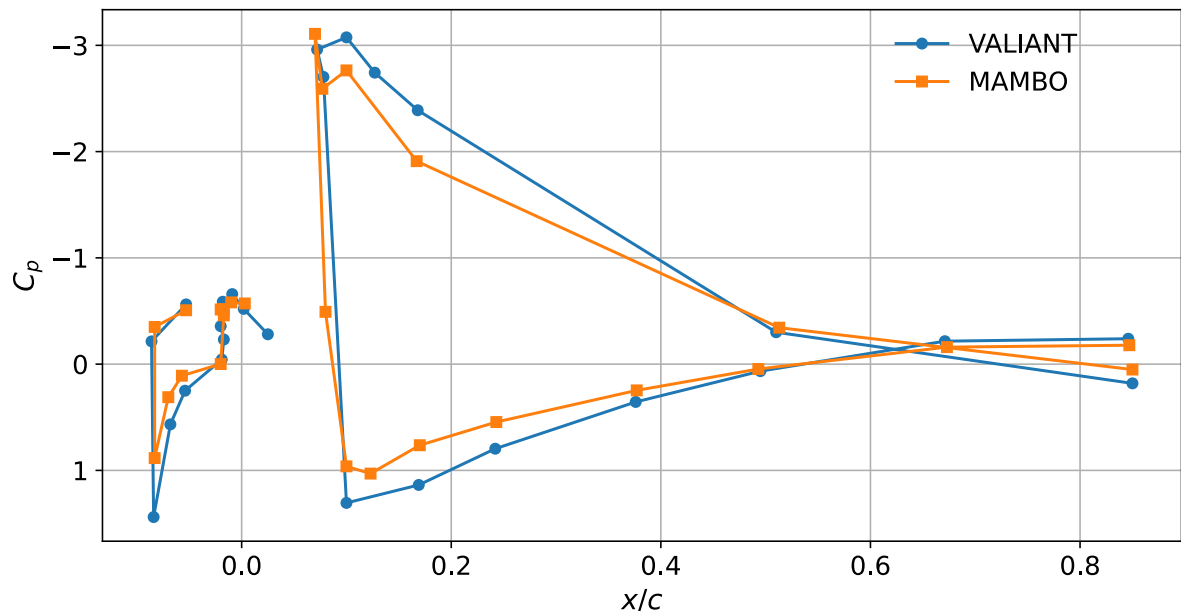
Velocidade [m/s]	T_{∞} [°C]	ρ_{∞} [kg/m ³]	q_{∞} [Pa]
25	11,3	1,217	381
50	15,7	1,199	1500
75	23,6	1,167	3280

Fonte: Autor (2026).

Os resultados são apresentados em função da coordenada adimensional x/c , em que x representa a posição ao longo da corda e c a corda do aerofólio.

A Figura 18 apresenta uma comparação entre as duas configurações, mostrando que o aerofólio MAMBO exibe menores magnitudes de C_p ao longo da maior parte da superfície. Essa tendência está de acordo com a redução esperada dos efeitos de interferência das paredes devido à melhoria da razão de bloqueio da configuração atual.

Figura 18 – Comparação entre coeficiente de pressão (C_p) medido durante as campanhas de teste VALIANT e MAMBO



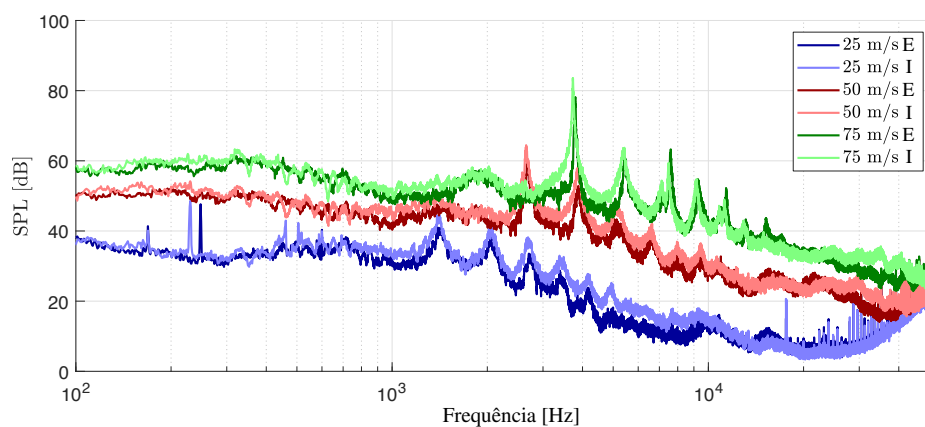
Fonte: Autor (2026).

4.4 TRATAMENTO DOS DADOS ACÚSTICOS

Para analisar o campo acústico irradiado, diversos microfones foram utilizados. Para fins de clareza, o microfone central do arranjo circular (M4) é adotado como referência. A Figura 19 apresenta os espectros acústicos em termos de Nível de Pressão Sonora (SPL) para as três velocidades testadas (a 25, 50 e 75 m/s), com medições realizadas tanto nos microfones do extradorso (*E*) quanto do intradorso (*I*) do perfil. Para cada velocidade, os espectros registrados no lado do intradorso apresentam amplitudes ligeiramente maiores em comparação com aqueles do extradorso. Esse comportamento é consistente com a diretividade observada para o ruído de slat por Lockard e Choudhari (2009), que apresenta máximos de radiação acústica no quadrante inferior traseiro da configuração. Considerando que a cavidade do slat é orientada para o intradorso, espera-se que uma parcela significativa da energia acústica gerada nessa região seja irradiada preferencialmente nessa direção.

Também se observa uma clara relação com a velocidade do escoamento. À medida que a velocidade aumenta de 25 m/s para 75 m/s, os níveis sonoros globais elevam-se e os picos espectrais deslocam-se para frequências mais altas. Esse comportamento está de acordo com o esperado para fontes aeroacústicas associadas ao escoamento sobre dispositivos hipersustentadores, nas quais a intensidade do ruído cresce com a velocidade do escoamento, enquanto as frequências características escalam aproximadamente com a velocidade convectiva das estruturas vorticiais (Brooks *et al.*, 1989). Dessa forma, velocidades mais elevadas resultam simultaneamente em maiores amplitudes acústicas e em componentes tonais concentradas em frequências mais elevadas.

Figura 19 – Espectro acústico do microfone de referência M4 em nível de pressão sonora para as três velocidades de escoamento em função da frequência



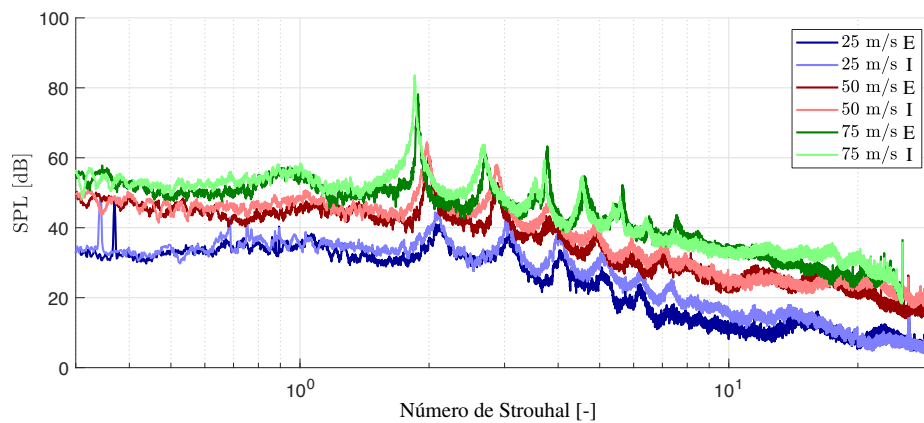
Fonte: Autor (2026).

Em relação à Figura 20, a PSD é agora apresentada em função do número de Strouhal, permitindo comparar os resultados obtidos em diferentes velocidades de es-

coamento por meio de uma frequência adimensional. Esse resultado está de acordo com observações reportadas na literatura para ruído de slat, nas quais os componentes tonais associados à dinâmica da camada de cisalhamento e aos mecanismos de retroalimentação da cavidade tendem a ocorrer em intervalos semelhantes de número de Strouhal (Zhang *et al.*, 2024). Dessa forma, a adimensionalização evidencia que, apesar da variação da velocidade do escoamento, os principais mecanismos aeroracústicos permanecem associados a uma mesma faixa característica de escalas temporais.

$$St = \frac{f s}{U_{\infty}}, \quad (19)$$

Figura 20 – Espectro acústico do microfone de referência M4 em nível de pressão sonora para as três velocidades de escoamento em função do número de Strouhal

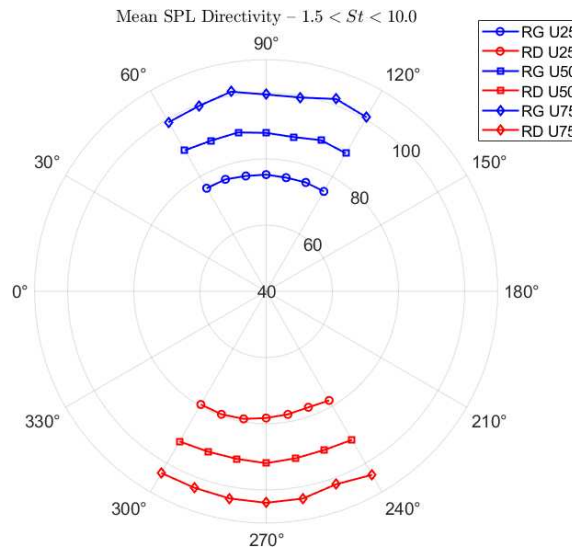


Fonte: Autor (2026).

Essa faixa de número de Strouhal (e sua correspondente banda de frequências) foi, então, selecionada para o cálculo do Nível Global de Pressão Sonora (OASPL) a partir de uma aquisição acústica de 60 s. Os resultados, apresentados na Figura 21, indicam um aumento de aproximadamente 13 dB entre velocidades consecutivas do escoamento, resultando em uma diferença total de cerca de 26 dB entre a menor e a maior velocidade. Além disso, o intradorso apresenta consistentemente níveis em torno de 4 dB superiores aos do extradorso. Na figura, RD corresponde ao intradorso e RG ao extradorso do elemento de asa.

No que se refere à câmera acústica, responsável pelo registro simultâneo do sinal acústico e de imagens sincronizadas, as Figuras 22 e 23 apresentam resultados obtidos para $U_{\infty} = 50$ m/s. O software de processamento permite selecionar uma faixa específica de frequências no espectro, nos quais os mapas de contorno de SPL são sobrepostos à imagem correspondente, evidenciando a distribuição espacial das fontes de ruído. Duas bandas de frequência são apresentadas: 3625 - 4025 Hz (Fi-

Figura 21 – Diretividade em OASPL



gura 22a) e 4275 - 4700 Hz (Figura 23a), onde a primeira faixa foi selecionada de modo a coincidir com um dos picos tonais dominantes do espectro acústico, enquanto a segunda foi escolhida em uma região de mínimo local entre componentes tonais adjacentes, na qual a contribuição tonal é menos pronunciada. Os resultados indicam que a primeira banda está predominantemente associada ao bordo de ataque do aerofólio (Figura 22b), evidenciando mecanismos de ruído relacionados ao slat (Rakhshani; Filippone, 2006), enquanto a segunda banda encontra-se principalmente concentrada no bordo de fuga do elemento (Figura 23b), parte dominada pela turbulência e ruído de banda larga (Amiet, 1976; Brooks *et al.*, 1989).

Figura 22 – Localização das fontes de ruído utilizando a câmera acústica. Faixa de frequência: 3625 - 4025 Hz.

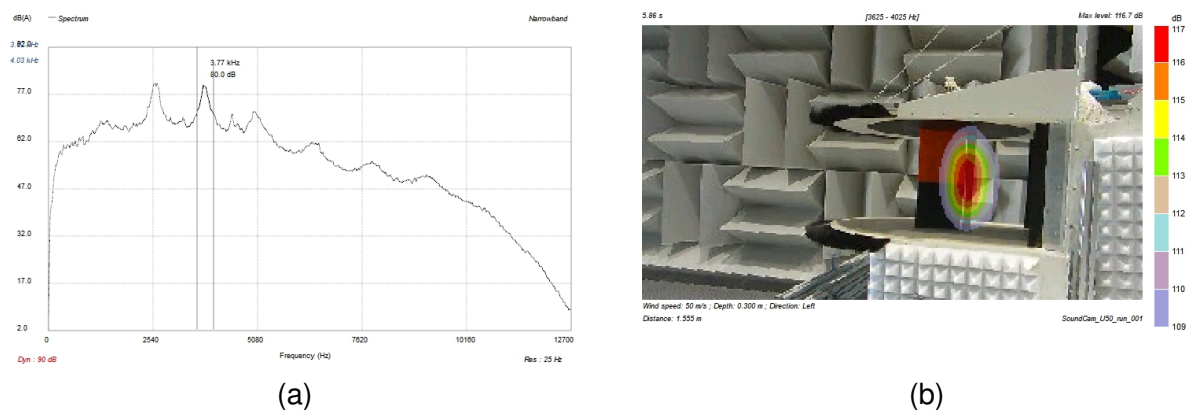
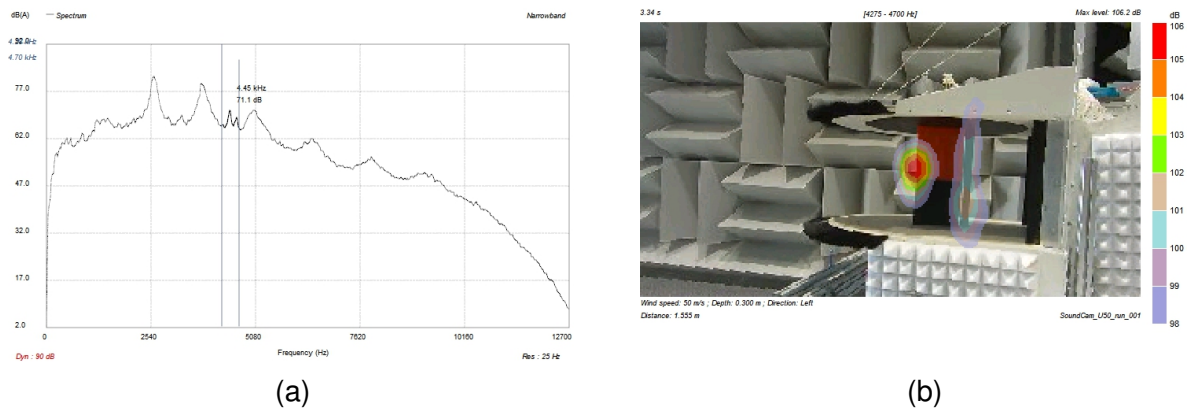


Figura 23 – Localização das fontes de ruído utilizando a câmera acústica. Faixa de frequência: 4275 - 4700 Hz.

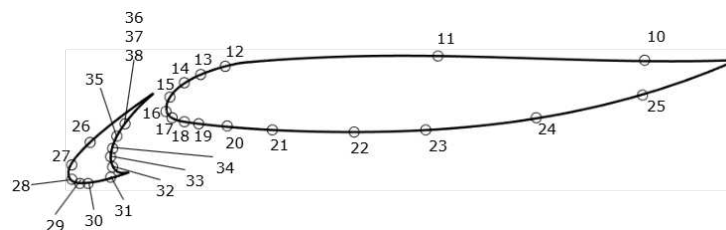


Fonte: Autor (2026).

4.5 PRESSÃO DE PAREDE

A Figura 25 apresenta a densidade espectral de potência (PSD) dos sinais de pressão de parede não estacionária medidos em diferentes posições ao longo da superfície do aerofólio para $U_{\infty} = 50$ m/s e um ângulo de ataque de referência de $17,5^{\circ}$. A localização dos canais de tomada de pressão é reapresentada na Figura 24 para facilitar a interpretação dos resultados apresentados nesta seção.

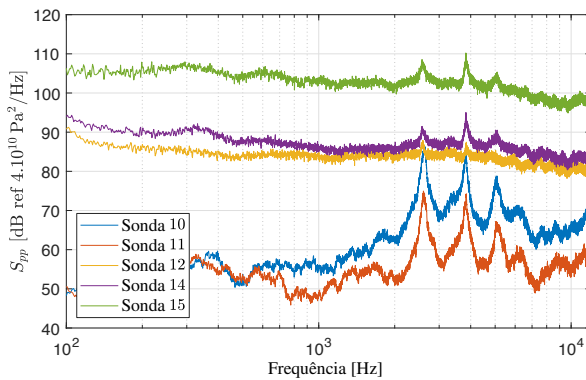
Figura 24 – Posições dos canais de tomada de pressão



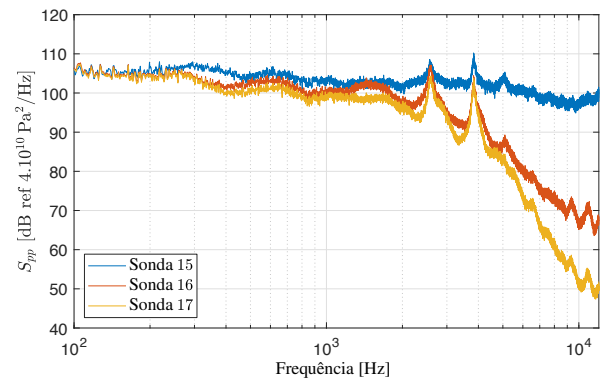
Fonte: Autor (2026).

Uma observação marcante é que para todos os pontos de tomada de pressão o primeiro pico espectral ocorre exatamente na mesma frequência do pico dominante presente no espectro acústico de campo distante para a mesma condição de escoamento (Figura 19). Essa correspondência evidencia a ligação direta entre as flutuações de pressão na parede e o som irradiado e está em concordância com a teoria de Ffowcs-Williams e Hawkings (1969), enfatizando o papel da dinâmica do escoamento na definição da assinatura acústica da configuração asa-slat. Em particular, isso sugere que as flutuações de pressão no interior da cavidade do slat e em sua saída são contribuintes importantes tanto para o ruído de banda larga quanto para os componentes tonais observados nas medições acústicas. Tal observação está em conformidade com os estudos de Pascioni e Cattafesta (2018), que identificou uma correspondên-

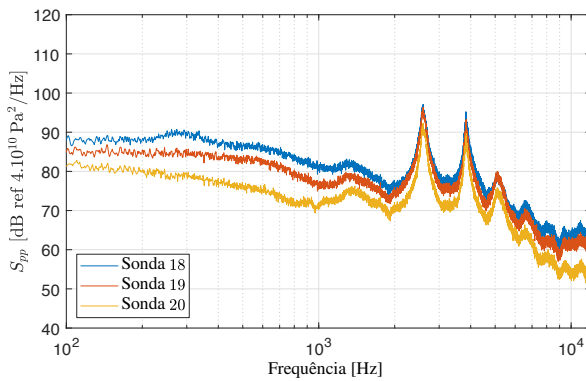
Figura 25 – Densidade espectral de potência dos captores de flutuação de pressão, $U_{\infty} = 50 \text{ m/s}$



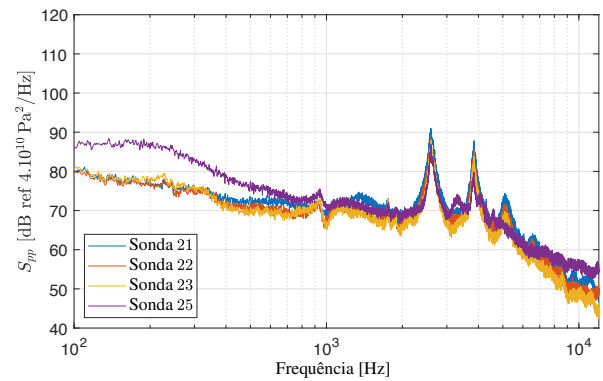
(a) Extradorso do elemento principal



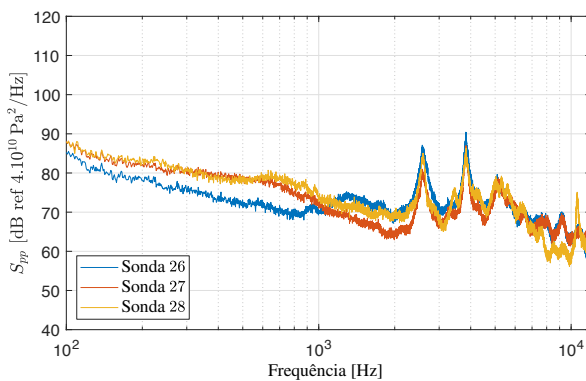
(b) Bordo de ataque do elemento principal



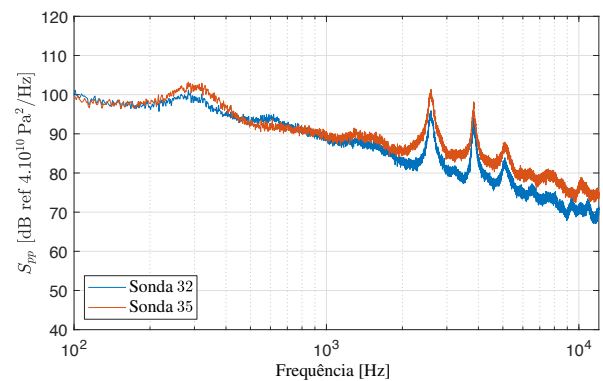
(c) Intradorso do elemento principal (a montante)



(d) Intradorso do elemento principal (a jusante)



(e) Bordo de ataque do slat



(f) Cavidade do Slat

Fonte: Autor (2026).

cia direta entre as frequências tonais no campo próximo e distante, e Terracol *et al.* (2016), que atribuem o ruído de banda larga às instabilidades de Kelvin-Helmholtz na camada de cisalhamento. Além disso, a distorção de estruturas turbulentas ao passarem pelo vão na saída da cavidade é apontada como uma fonte primária de flutuações de banda larga.

Além disso, as amplitudes relativas dos espectros de pressão nas diferentes posições das sondas fornecem informações sobre a forma como as estruturas flutuantes do escoamento interagem com a superfície do aerofólio. Níveis mais elevados de energia próximos à região da cavidade (Figuras 25b e 25f) são consistentes com o intenso desprendimento de vórtices e com as instabilidades da camada de cisalhamento identificadas na análise de PIV, enquanto o decaimento gradual da energia espectral mais a jusante (Figuras 25a e 25d) indica perda de intensidade à medida que as estruturas são transportadas pelo escoamento.

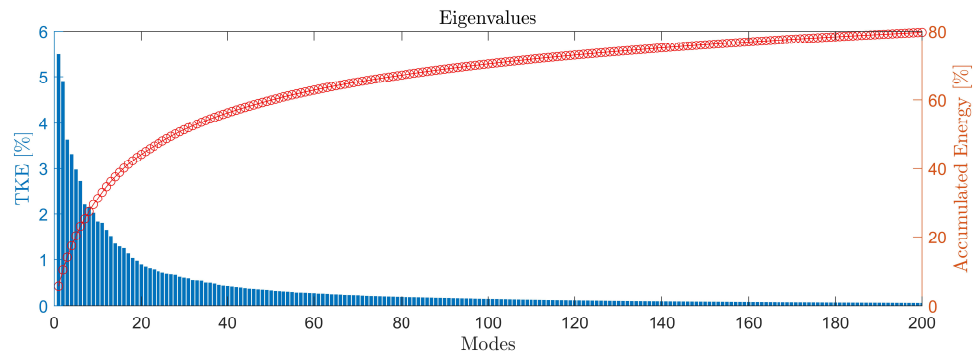
Além disso, a Figura 25a mostra que as sondas localizadas próximas ao bordo de ataque da asa, isto é, próximas à saída da cavidade, estão expostas a maiores velocidades e níveis de turbulência, como evidenciado na Figura 16b, resultando em uma amplificação significativa do conteúdo de banda larga. Em contraste, as sondas posicionadas mais a jusante apresentam picos tonais mais pronunciados. Este comportamento é coerente com as observações de Terracol *et al.* (2016), que indicam que sensores em regiões menos contaminadas por estruturas turbulentas de pequena escala permitem uma visualização mais clara das frequências tonais irradiadas pela cavidade. Além disso, tais picos podem estar associados ao desprendimento de vórtices no bordo de fuga do slat, um mecanismo de fonte tonal bem documentado em configurações hiper sustentadoras (Knacke; Thiele, 2008; Zhang *et al.*, 2024).

4.6 RESULTADO DA ANÁLISE POD

A Figura 26 apresenta a distribuição de energia ao longo dos primeiros 200 modos da POD das componentes horizontal e vertical da velocidade. Como esperado, os primeiros modos concentram a maior parcela da energia cinética total, indicando sua predominância na dinâmica do escoamento (Sirovich, 1987). Esse decaimento de energia fornece informações importantes sobre a coerência e a complexidade das estruturas presentes no escoamento. Esse perfil energético pode servir de base para a seleção de modos relevantes em futuras reconstruções do campo de velocidades ou em análises direcionadas, dependendo do nível de detalhe e da energia acumulada desejados.

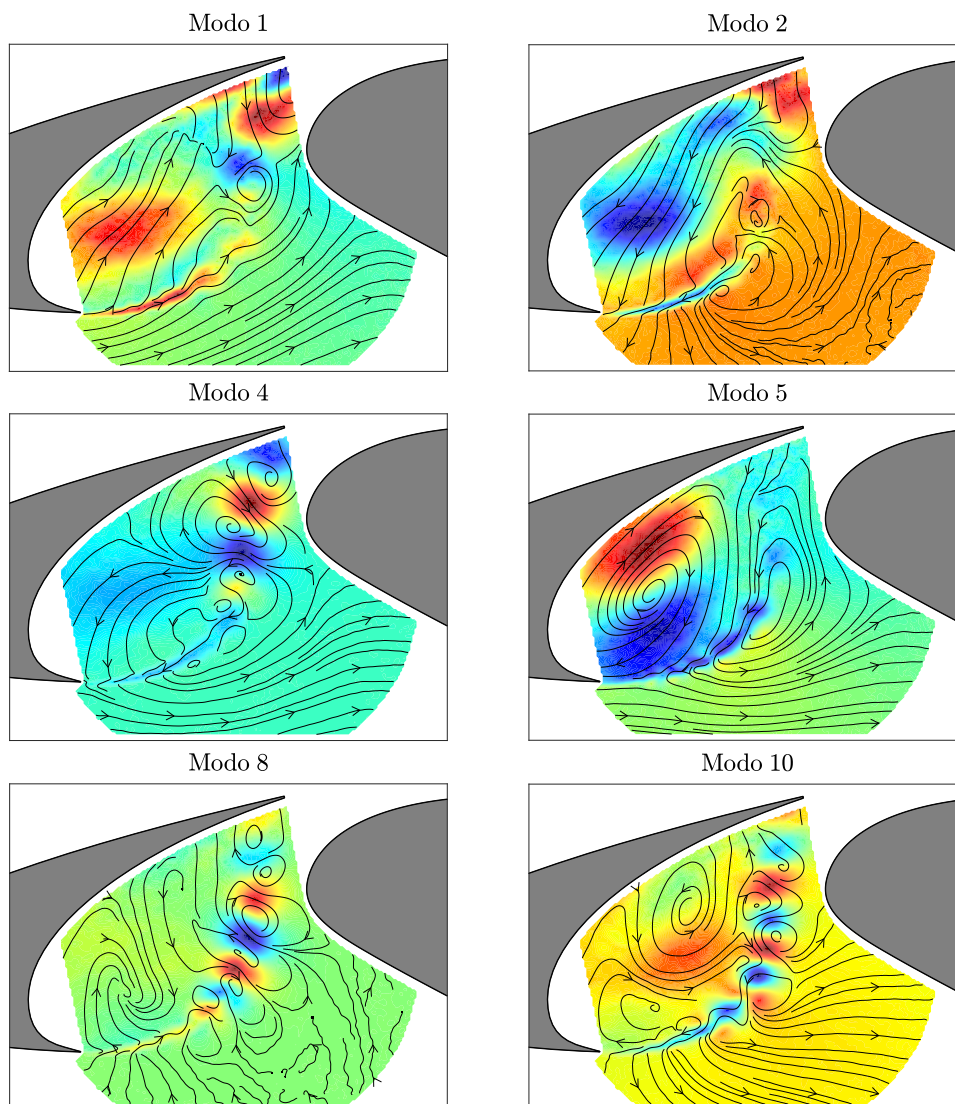
A Figura 27 apresenta os Modos POD 1, 2, 4, 5, 8 e 10 (o 3º modo foi omitido por apresentar forte semelhança com o Modo 4 e, portanto, não acrescentar informações estruturais adicionais). Os Modos 1, 2 e 5 evidenciam estruturas coerentes que abrangem principalmente a região de recirculação no interior da cavidade do slat. Em contraste, os Modos 4, 8 e 10 tendem a isolar essas duas regiões, representando predominantemente as estruturas de vórtice formadas na cúspide e levadas pela camada de cisalhamento. As linhas de corrente foram calculadas utilizando as componentes horizontal e vertical da velocidade dos modos espaciais, com o objetivo de fornecer

Figura 26 – Energia dos modos da POD



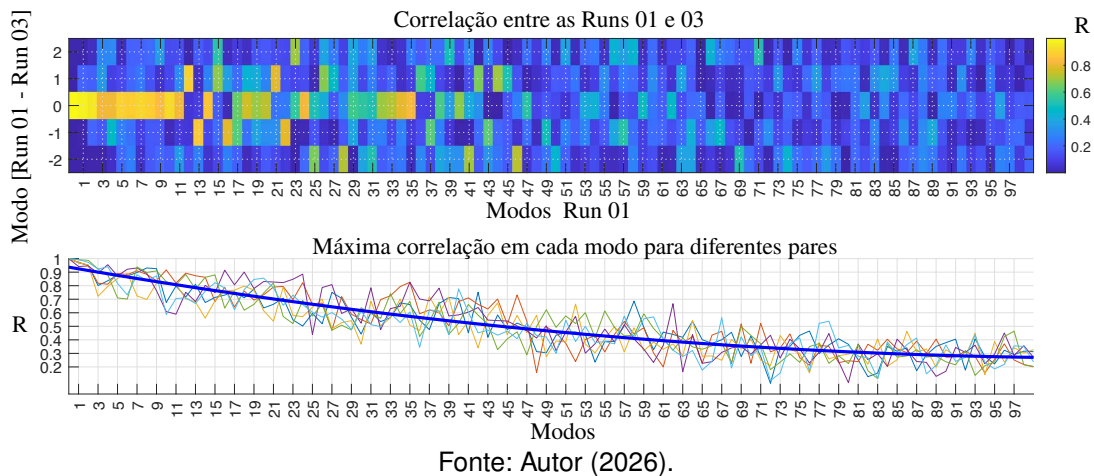
uma visualização mais clara dos padrões dominantes de escoamento capturados por cada modo.

Figura 27 – Modos 1, 2, 4, 5, 8 e 10 da componente horizontal de velocidade a $25m/s$



A Figura 28 apresenta as curvas de correlação modal obtidas para diferentes pares de execuções independentes. O gráfico superior ilustra o valor do coeficiente R de correlação entre duas execuções independentes, enquanto o gráfico inferior apresenta o coeficiente máximo de correlação para diferentes pares de execuções em cada modo. A curva azul proeminente é o resultado da média dos valores máximos de R para cada modo e foi usada como parâmetro para a definição dos modos de corte. Observa-se elevada repetibilidade dos primeiros modos, seguida por uma redução progressiva da correlação para modos de ordem superior. Na figura, a nomenclatura *Run* refere-se às diferentes execuções realizadas sob uma mesma condição de escoamento.

Figura 28 – Correlação cruzada entre um par de execuções



A Tabela 3 resume os dois limiares de modos identificados para cada lado e velocidade do escoamento livre nas duas zonas detalhadas de PIV (1.1 e 1.2). Pode-se observar que, para o intradorso do escoamento (zona 1.1), onde a cavidade do slat constitui a principal região de interesse, os modos de corte tanto para estruturas altamente correlacionadas (k_{alt}) quanto moderadamente correlacionadas (k_{mod}) permanecem essencialmente próximos para as três velocidades testadas (25, 50 e 75 m/s). Esse resultado evidencia a robustez da organização do escoamento no interior da cavidade, mostrando que o aumento da velocidade do escoamento livre não conduz a uma perda significativa de coerência nem a uma redução prematura dos modos POD. Em outras palavras, mesmo em 75 m/s, o escoamento mantém um grau de correlação espacial semelhante ao observado em velocidades menores, sugerindo que o aumento do número de Reynolds não induz uma degradação perceptível da consistência modal e que as dinâmicas impostas pela geometria prevalecem sobre os efeitos da velocidade dentro da faixa estudada.

Para o extradorso do elemento da asa, onde os vórtices ejetados através do vão do slat interagem com o escoamento superior, resultados distintos são observados. O modo de corte para o caso altamente correlacionado permanece em valores

Tabela 3 – Modos de corte para parcelas altamente e moderadamente correlacionadas do escoamento em função da zona de PIV e da velocidade nominal do escoamento.

Zona	U25		U50		U75	
	k_{alt}	k_{mod}	k_{alt}	k_{mod}	k_{alt}	k_{mod}
1.1	5	44	6	48	7	44
1.2	4	24	8	35	3	22

Fonte: Autor (2026).

baixos, entre 3 e 8, enquanto para o caso moderadamente correlacionado o valor é aproximadamente reduzido à metade, em torno de 24 para 25 e 75 m/s e 35 para 50 m/s. Apesar de uma pequena diferença em 50 m/s, os modos de corte para as três velocidades distintas permanecem relativamente consistentes entre si, indicando também boa coerência. Em comparação com a zona 1.1, a redução desses valores pode ser atribuída à turbulência mais intensa nesse lado do escoamento, causada pela interação dos vórtices de alta velocidade com o escoamento sobre o extradorso, o que reduz sua previsibilidade e coerência.

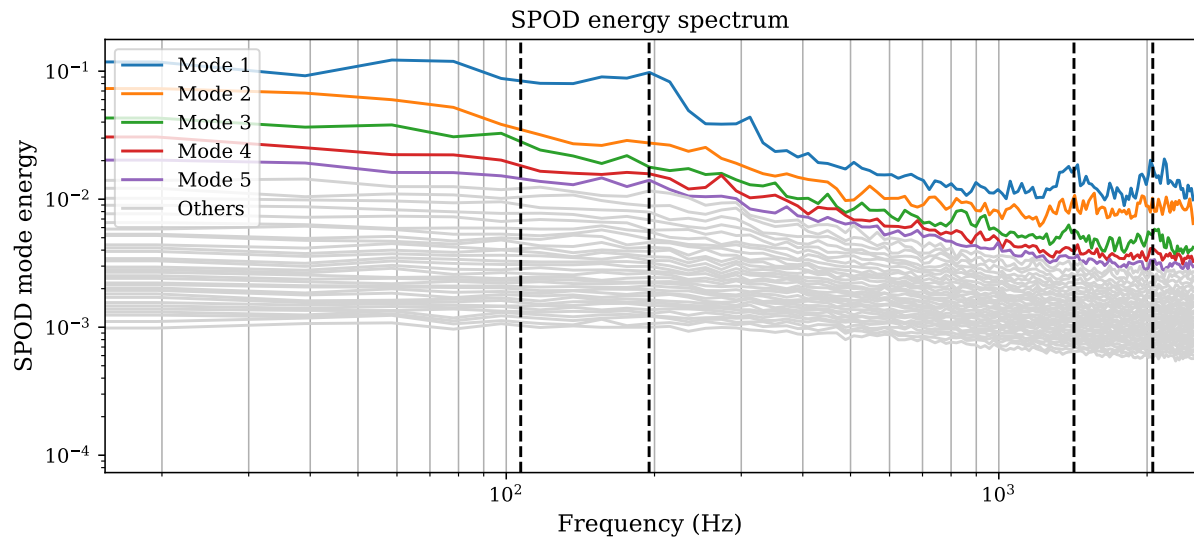
4.7 RESULTADO DA ANÁLISE SPOD

A Figura 29 ilustra o espectro de energia de cada modo ao longo do domínio de frequências para a Zona 1.1 do PIV a 25 m/s. Pode-se observar que o primeiro modo é claramente dominante, pois sua amplitude é significativamente maior que a do segundo modo, indicando que ele contém uma parcela substancial da energia do escoamento. Uma grande separação entre os autovalores associados ao primeiro e ao segundo modos SPOD constitui um bom indicativo da predominância de um único mecanismo.

Como mencionado anteriormente, frequências representativas devem ser selecionadas para a análise SPOD. A partir do espectro acústico mostrado na Figura 19, os dois primeiros picos em 25 m/s ocorrem em 1421 Hz e 2054 Hz. Além disso, a frequência de 107 Hz foi selecionada com base na definição de $St = 0,16$ para o escoamento da região de recirculação da cavidade do slat evidenciado por Murali *et al.* (2024).

A Figura 30 apresenta os três primeiros modos correspondentes às frequências selecionadas. Deve-se notar que o valor indicado no título corresponde à frequência discretizada mais próxima do valor-alvo. Para o primeiro modo em 117 Hz, a distribuição espacial corresponde claramente ao escoamento da cavidade do slat, o qual também se destaca no Modo 5 da POD (Figura 27). Essa observação é consistente com a correspondência entre modos POD de menor energia e modos SPOD de baixa

Figura 29 – Distribuição energética dos modos SPOD a $U_{\infty} = 25$ m/s para a componente de velocidade U



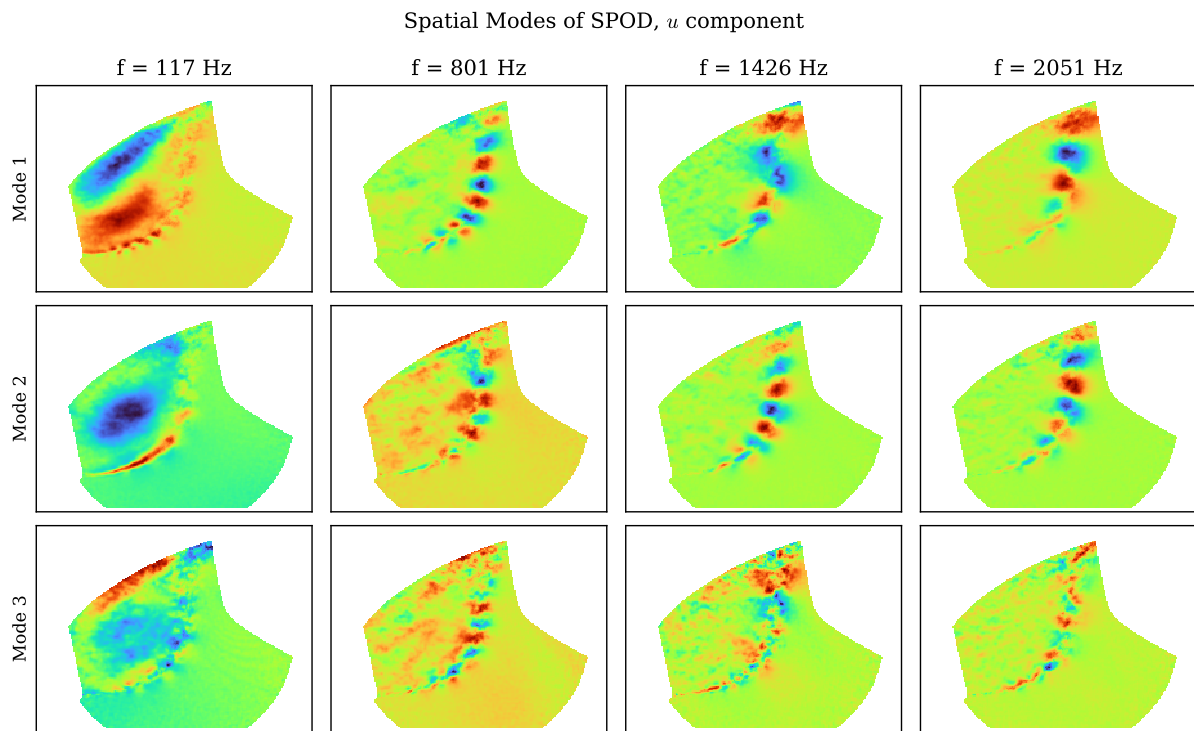
Fonte: Autor (2026).

frequência e baixa ordem, associados ao escoamento recirculante da cavidade. Para as frequências associadas aos picos tonais do espectro acústico (1426 Hz e 2051 Hz), os modos espaciais exibem uma relação clara com a formação, ejeção e convecção de estruturas de vórtice geradas na cúspide do slat. Esses modos evidenciam padrões coerentes alinhados à dinâmica da camada de cisalhamento, reforçando a conexão entre as estruturas de escoamento identificadas pela SPOD e as assinaturas acústicas observadas no espectro. A presença dos modos em 800 Hz será discutida ao final desta seção.

O segundo modo também apresenta coerência com as estruturas dominantes do escoamento, sugerindo que este retém energia suficiente para capturar algumas das principais características da dinâmica investigada. Sua organização espacial permanece identificável, com padrões que podem ser relacionados àqueles observados no modo mais energético. Em contraste, o terceiro modo apresenta uma degradação perceptível da coerência, com uma distribuição espacial mais irregular e fragmentada. Esse comportamento sugere uma menor contribuição energética, tornando mais difícil identificar e isolar estruturas coerentes subjacentes, uma vez que elas passam a ser progressivamente obscurecidas por flutuações menos organizadas.

Curiosamente, ao observar o primeiro modo para cada uma das frequências, observa-se que as estruturas de desprendimento de vórtice não aparecem exclusivamente na frequência do primeiro pico tonal. Na realidade, padrões semelhantes aos identificados nos modos POD, bem como em 1426 Hz e 2051 Hz, já podem ser observados em torno de 800 Hz. Isso indica que a simples presença de estruturas vor-

Figura 30 – Primeiros 3 modos em quatro frequências representativas em $U_\infty = 25$ m/s



Fonte: Autor (2026).

tais não está unicamente associada a uma radiação acústica significativa, uma vez que nenhuma variação relevante é observada no espectro acústico nessa frequência, corroborando as observações de Souza *et al.* (2019).

Outra observação relevante surge ao aplicar o mesmo procedimento ao caso a $U_\infty = 50$ m/s. Nessa condição, o padrão de desprendimento de vórtice torna-se pouco distinguível. Conforme indicado na Figura 19, os picos tonais de ruído deslocam-se para frequências superiores à limitação de 2500 Hz imposta pela aquisição PIV. Esses resultados reforçam ainda mais a relação entre o ruído tonal do slat e os processos de ejeção e impacto de vórtices na camada de cisalhamento. Nesse contexto, a interpretação dos resultados de SPOD beneficia-se da consideração conjunta das estruturas modais e de seu conteúdo espectral associado, uma vez que este último fornece contexto sobre a importância relativa de cada modo.

4.8 IDENTIFICAÇÃO DE VÓRTICES

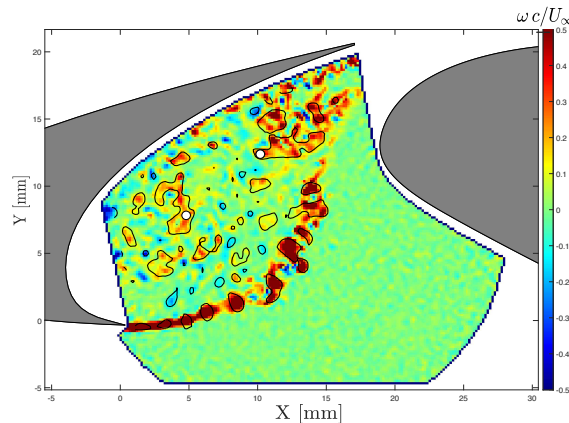
Após a determinação dos modos de corte, o campo de escoamento é reconstruído utilizando uma parcela da energia total do escoamento, permitindo a separação e análise de duas componentes distintas: as parcelas altamente e moderadamente correlacionadas. Para a região da cavidade do slat em $U_\infty = 25$ m/s, a primeira componente captura principalmente o movimento de recirculação de grande escala

no interior da cavidade, enquanto a segunda é claramente dominada por pequenos vórtices turbulentos gerados na cúspide do slat. Essa análise fornece a base para a próxima etapa deste estudo.

Como mencionado anteriormente, uma parcela significativa do ruído gerado por uma asa equipada com slat se origina da formação de vórtices de grande e pequena escala. Essas estruturas impactam superfícies sólidas, causando flutuações de pressão que contribuem para as emissões acústicas. Um dos principais desafios dessa análise consiste em determinar a trajetória seguida por esses vórtices, uma vez que eles podem permanecer retidos no interior da cavidade do slat devido à recirculação ou serem ejetados através do vão do slat e impactar a superfície da asa principal.

O método de identificação de vórtices apresentado foi aplicado aos campos de velocidade obtidos por meio do PIV, na tentativa de rastrear a trajetória dos vórtices formados. Entretanto, devido à grande quantidade de dados e à natureza turbulenta do escoamento, os resultados mostraram-se excessivamente ruidosos para identificar com precisão os centros de vórtice (Figura 31). Dessa forma, o algoritmo foi implementado nos campos de velocidade reconstruídos via POD, separadamente para cada parcela dos movimentos correlacionados. Essa abordagem produziu resultados significativamente mais promissores.

Figura 31 – Γ_1 e Γ_2 aplicadas ao escoamento original do PIV



Fonte: Autor (2026).

Para o primeiro grupo de modos POD, os maiores valores da função Γ_1 concentraram-se no centro da cavidade, evidenciando a presença de um escoamento recirculante nesta região do slat. O centro do vórtice não permaneceu completamente estacionário, uma vez que movimentos na direção da envergadura provocam pequenos deslocamentos dentro da cavidade (Knacke; Thiele, 2008). A Figura 32a ilustra um instante representativo do escoamento reconstruído, em que o mapa de cor representa os valores normalizados de vorticidade.

Quanto aos modos da POD moderadamente correlacionados (Figura 32b), os resultados mostraram-se ainda mais elucidativos. Como esses modos capturam predominantemente os vórtices desprendidos da cúspide do slat e formados na camada de cisalhamento, cada instante temporal revelou múltiplos centros vorticosos potenciais. Notavelmente, os resultados estão em concordância com conhecimentos já estabelecidos sobre a aerodinâmica de slats reportadas por Jenkins *et al.* (2004): tais vórtices podem ser tanto recapturados pela recirculação da cavidade quanto ejetados através da abertura do slat, região onde o módulo da velocidade atinge seus valores máximos. Essas duas trajetórias distintas estão intimamente relacionadas aos mecanismos de geração de ruído e são fundamentais para a compreensão do comportamento aeroacústico da configuração. Nas Figuras 31 e 32, o símbolo ($\circ$) indica o centro dos vórtices identificados, os quais apresentam rotação no sentido anti-horário. Embora o algoritmo também tenha detectado estruturas com rotação no sentido horário, representadas pelo símbolo ($\times$), essas regiões provavelmente não correspondem a vórtices físicos. Em vez disso, acredita-se que estejam associadas às regiões de interação entre vórtices consecutivos da camada de mistura, onde o critério de identificação pode indicar falsos centros de vórtice. Essa interpretação é consistente com o comportamento típico de camadas de mistura sujeitas à instabilidade de Kelvin-Helmholtz, nas quais a camada de cisalhamento possui vorticidade predominante de um único sinal, dando origem a vórtices coerentes com um único sentido de rotação (Rogers; Moser, 1992).

Para investigar se as trajetórias desses vórtices dependem da velocidade do escoamento livre, as coordenadas das estruturas identificadas foram armazenadas em cada instante temporal e, em seguida, uma interpolação polinomial foi aplicada para obter uma trajetória média. Os resultados são apresentados, para as três velocidades analisadas, na Figura 33, em que as linhas cinzas representam as trajetórias instantâneas dos vórtices obtidas, enquanto a linha vermelha representa a trajetória média ao longo do intervalo temporal selecionado. Pode-se observar que, apesar do aumento da velocidade do escoamento livre, as trajetórias médias dos vórtices ejetados permanecem essencialmente inalteradas. Isso sugere que a trajetória convectiva das estruturas vorticosas apresenta fraca dependência do número de Reynolds dentro da faixa investigada. Além disso, a trajetória identificada coincide com a camada de cisalhamento visível na Figura 16b e com a distribuição média de vorticidade apresentada na Figura 17a, reforçando a consistência entre a dinâmica instantânea e as características médias do escoamento.

4.9 CORRELAÇÃO CRUZADA

A Figura 34a apresenta os mapas médios do coeficiente de correlação cruzada entre as componentes de velocidade em $U_\infty = 25$ m/s e o sinal acústico medido

Figura 32 – Comparação de Γ_1 e Γ_2 para as duas reconstruções do escoamento

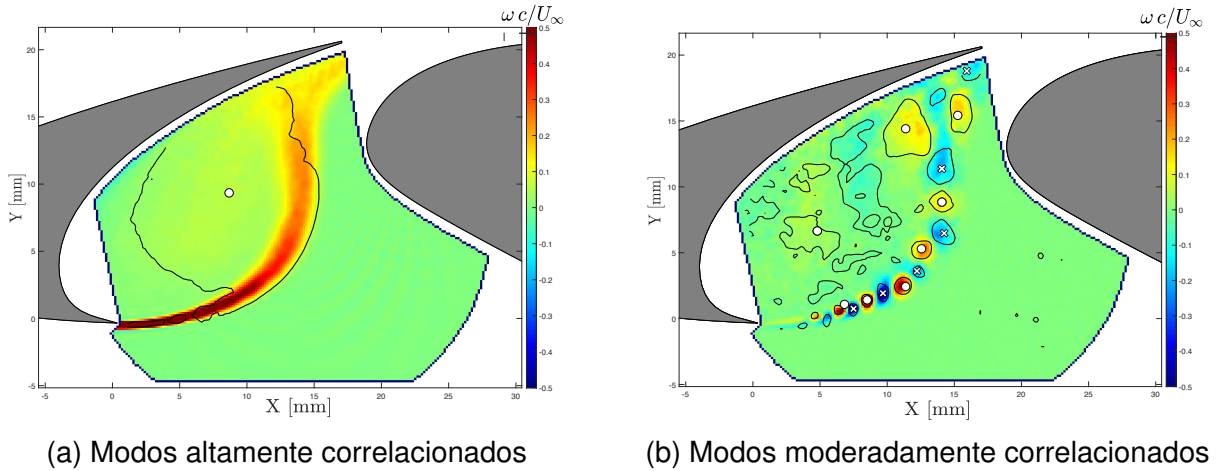
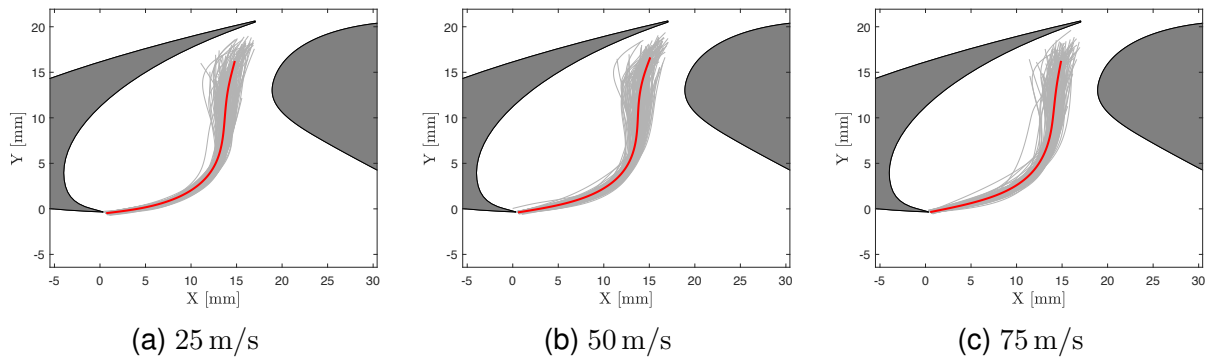


Figura 33 – Trajetória dos vórtices para três velocidades distintas



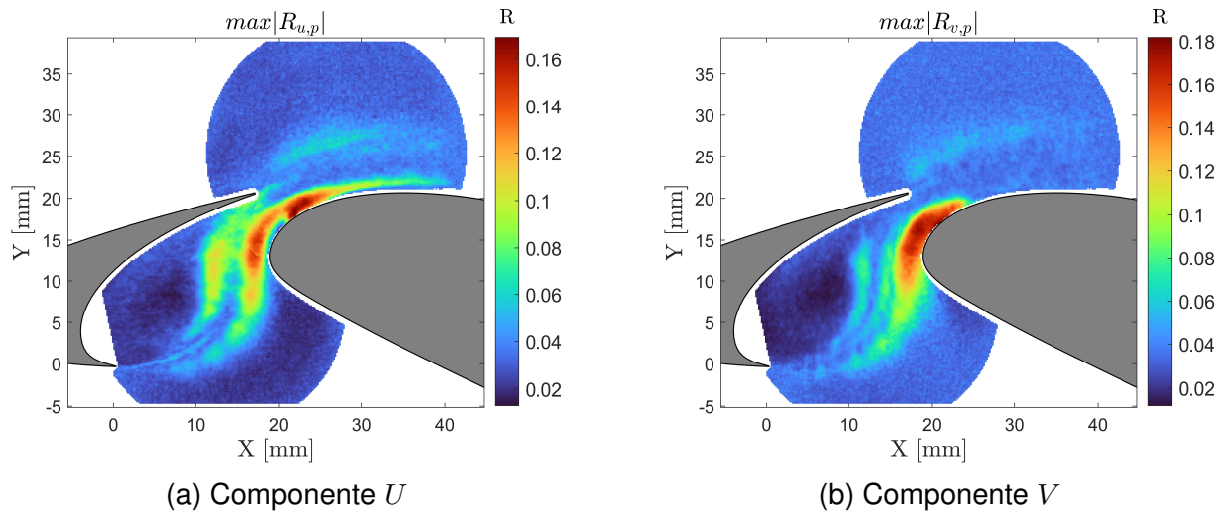
Fonte: Autor (2026).

pelo microfone M4.

Observa-se de forma particularmente evidente, especialmente para a componente vertical da velocidade, que regiões próximas ao bordo de ataque do elemento principal e à saída da cavidade apresentam os maiores valores do coeficiente de correlação, indicando uma associação entre as flutuações de velocidade nessas regiões e o campo acústico irradiado, comportamento semelhante ao observado por Siegel *et al.* (2018) em análises correlacionando medições de PIV e pressão acústica.

Os mapas de correlação mostram, ainda, que os valores máximos do coeficiente de correlação R situam-se entre 0,16 e 0,18, magnitudes compatíveis com aquelas reportadas por Henning *et al.* (2012) para análises correlacionando campos de velocidade e medições acústicas. Apesar de relativamente modestos, esses valores evidenciam regiões do escoamento com maior influência sobre o campo sonoro irradiado. Em particular, a componente horizontal U revela que o escoamento ao longo da camada de cisalhamento contribui significativamente para o ruído irradiado, provavelmente em decorrência da convecção dos vórtices nessa região, os quais tendem a

Figura 34 – Mapas do coeficiente de correlação cruzada R entre dados de velocidade e acústica para o microfone M4



Fonte: Autor (2026).

seguir trajetórias distintas (Henning *et al.*, 2012).

Como lembrança, cada lado do escoamento foi adquirido de forma independente, em instantes diferentes. A elevada coerência observada entre os lados do extradorso e intradorso evidencia a confiabilidade tanto das medições quanto da análise de correlação cruzada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo investigar os mecanismos de geração de ruído associados a um perfil de asa equipado com slat por meio da análise e pós-tratamento de dados experimentais. O estudo buscou correlacionar as estruturas do escoamento com os mecanismos de geração sonora por meio da integração de medições acústicas, pressão de parede, velocimetria por imagem de partículas (PIV), decomposição modal e técnicas de correlação cruzada.

A caracterização do escoamento evidenciou a presença de uma extensa região de recirculação no interior da cavidade do slat, delimitada por uma camada de cisalhamento instável responsável pela formação e convecção de estruturas vorticais ao longo do escoamento. Os campos médios e instantâneos obtidos por PIV mostraram que essa região concentra os principais fenômenos dinâmicos observados, destacando o papel da camada de cisalhamento na organização das estruturas coerentes presentes na cavidade.

As medições acústicas e de pressão de parede permitiram identificar o conteúdo espectral associado ao escoamento sobre o perfil, enquanto os resultados de beamforming confirmaram a predominância da região do slat como principal fonte emissora de ruído na configuração analisada.

A aplicação da Decomposição Ortogonal Própria permitiu decompor os campos de velocidade em modos espaciais representativos dos principais fenômenos presentes no escoamento. Adicionalmente, uma análise estatística de correlação entre modos obtidos em execuções independentes possibilitou avaliar sua repetibilidade e definir critérios objetivos para a seleção modal. Os primeiros modos apresentaram associação predominante com a dinâmica da região de recirculação da cavidade, enquanto modos de ordem superior mostraram maior relação com as estruturas vorticais transportadas pela camada de cisalhamento. Com base nesses resultados, foi possível estabelecer critérios objetivos para a seleção de modos altamente e moderadamente correlacionados, permitindo distinguir estruturas recorrentes do escoamento de componentes menos organizadas e mais sensíveis às flutuações turbulentas.

A utilização dos campos reconstruídos possibilitou a aplicação dos métodos de identificação e rastreamento de vórtices, que permitiu caracterizar com maior clareza a dinâmica das estruturas coerentes presentes na região da cavidade. Os resultados obtidos indicaram que os vórtices identificados estão intimamente relacionados à evolução da camada de cisalhamento e à interação entre o escoamento recirculante e o escoamento externo. Além disso, a trajetória de convecção dos vórtices ao longo da camada de mistura mostrou-se independente da velocidade de escoamento livre e revelou que as estruturas podem tanto impactar a estrutura do elemento de asa

quanto ser ejetados a alta velocidade em direção ao extradorso.

De forma complementar, a análise por SPOD permitiu investigar a organização espacial-temporal das estruturas do escoamento em diferentes frequências, fornecendo uma interpretação espectral dos fenômenos observados nos campos de velocidade. Os resultados mostraram boa concordância com as estruturas identificadas pela POD, reforçando a existência de padrões coerentes associados aos mecanismos dominantes do escoamento. Os resultados também indicaram que a presença dessas estruturas não implica necessariamente em uma contribuição significativa para a geração de ruído.

Por fim, a análise de correlação cruzada entre os dados aerodinâmicos e acústicos revelou regiões de elevada associação entre as flutuações do escoamento e os sinais sonoros medidos. As maiores correlações foram observadas próximas à camada de cisalhamento, à região de desprendimento de vórtices e à saída da cavidade do slat próximo ao bordo de ataque da asa, indicando que essas estruturas desempenham papel importante nos mecanismos de geração de ruído observados experimentalmente.

Em conjunto, os resultados indicam que as estruturas associadas à camada de cisalhamento da cavidade do slat desempenham papel central nos mecanismos aeroacústicos observados, estando diretamente relacionadas às regiões de maior correlação entre o escoamento e os sinais acústicos medidos. A combinação de técnicas experimentais e métodos avançados de pós-processamento mostrou-se eficaz para a investigação desses fenômenos, fornecendo uma metodologia capaz de relacionar informações espaciais, temporais e espectrais em estudos aeroacústicos envolvendo dispositivos hipersustentadores.

REFERÊNCIAS

- AMIET, R. K. Noise due to turbulent flow past a trailing edge. **Journal of Sound and Vibration**, v. 47, n. 3, p. 387–393, 1976.
- AVIAÇÃO CIVIL ANAC, A. N. de. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil. RBAC Nº 161. Emenda Nº 4. 01/03/2024**. 2024. <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbac>.
- ANDERSON, J. D. **Fundamentals of Aerodynamics**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- ANDREWS, C.; DAVIES, J.; SCHWARTZ, G. Adaptive data compression. **Proceedings of the IEEE**, v. 55, p. 267–277, 1967.
- BENDAT, J. S.; PIERSON, A. G. **Random Data: Analysis and Measurement Procedures**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- BERKOOZ, G.; HOLMES, P.; LUMLEY, J. L. The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 25, n. 1, p. 539–575, 1993.
- BISTAFÁ, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018. ISBN (e-book): 978-85-212-1284-3. ISBN 978-85-212-1283-6.
- BLAKE, W. K. **Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration**. Orlando: Academic Press, 1986. v. 1.
- BROOKS, T. F.; POPE, D. S.; MARCOLINI, M. A. NASA Reference Publication, **Airfoil Self-Noise and Prediction**. 1989.
- BROWN, G. L.; ROSHKO, A. On density effects and large structure in turbulent mixing layers. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 64, n. 4, p. 775–816, 1974.
- BRUUN, H. H. **Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis**. New York: Oxford University Press, 1995.
- Brüel & Kjær. **Microphone Handbook**. Nærum, Denmark, 1996.
- BUTCHER, D.; SPENCER, A. Cross-correlation of pod spatial modes for the separation of stochastic turbulence and coherent structures. **Fluids**, v. 4, n. 3, p. 134, 2019.
- CASALINO, D.; GONZALEZ-MARTINO, I.; MANCINI, S. On the rossiter-heller frequency of resonant cavities. **Aerospace Science and Technology**, v. 131, p. 108013, 2022.
- CHOUDHARI, M.; KHORRAMI, M. Effect of three-dimensional shear-layer structures on slat cove unsteadiness. **AIAA Journal**, v. 45, p. 2174–2186, 2007.
- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. **Mathematics of Computation**, v. 19, n. 90, p. 297–301, 1965.

CURLE, N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 231, n. 1187, p. 505–514, 1955.

DAM, C. The aerodynamic design of multi-element high-lift systems for transport airplanes. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 38, p. 101–144, 2002.

DEPARDON, S.; VASSILICOS, J. C.; LÉVÊQUE, E. Instantaneous skin-friction pattern analysis using automated critical point detection on near-wall piv data. **Measurement Science and Technology**, v. 17, n. 5, p. 969–976, 2006.

FFOWCS-WILLIAMS, J. E.; HALL, L. H. Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 40, n. 4, p. 657–670, 1970.

FFOWCS-WILLIAMS, J. E.; HAWKINGS, D. L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 264, n. 1151, p. 321–342, 1969.

FILIPPONE, A. Aircraft noise prediction. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 68, p. 27–63, 2014.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: NR Editora, 1992.

GOLDSTEIN, M. E. **Aeroacoustics**. New York: McGraw-Hill, 1976.

GRAFTIEAUX, L.; MICHARD, M.; GROSJEAN, N. Combining piv, pod and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows. **Measurement Science and Technology**, v. 12, n. 9, p. 1422–1429, 2001.

GUO, Y. An aeroacoustic study of a leading edge slat configuration. **International Journal of Aeroacoustics**, v. 1, n. 3, p. 241–274, 2002.

HENNING, A.; WREDE, B.; GEISLER, R. Aeroacoustic investigation of a high-lift device by means of synchronized piv and microphone measurements. *In*: **Proceedings of the 16th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATIONS OF LASER TECHNIQUES TO FLUID MECHANICS**. Lisboa, 2012.

HO, C.-M.; HUERRE, P. Perturbed free shear layers. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 16, p. 365–424, 1984.

HOWE, M. S. **Acoustics of Fluid-Structure Interactions**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1998.

ICAO, I. C. A. O. **Environmental Report 2016: Aircraft Noise – Chapter 2**. Montréal: ICAO, 2016. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx>.

JENKINS, L. N.; KHORRAMI, M. R.; CHOUDHARI, M. Characterization of unsteady flow structures near leading-edge slat: Part i: Piv measurements. *In*: **10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit**. [S.l.: s.n.], 2004.

KNACKE, T.; THIELE, F. Slat noise reduction using steady suction. *In: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. [S.l.: s.n.], 2008.

LECLÈRE, Q.; PEREIRA, A.; FINEZ, A.; SOUCHOTTE, P. Indirect calibration of a large microphone array for in-duct acoustic measurements. **Journal of Sound and Vibration**, v. 376, p. 48–59, aug 2016. ISSN 0022-460X.

LI, J.; ZHANG, W. The performance of proper orthogonal decomposition in discontinuous flows. **Theoretical & Applied Mechanics Letters**, Elsevier, v. 6, n. 4, p. 236–243, 2016.

LIGHTHILL, M. J. On sound generated aerodynamically. i. general theory. **Proceedings of the Royal Society A**, v. 211, n. 1107, p. 564–587, 1952.

LOCKARD, D. P.; CHOUDHARI, M. M. Noise radiation from a leading-edge slat. *In: 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. Miami, Florida, USA: [s.n.], 2009.

LUMLEY, J. L. The structure of inhomogeneous turbulent flows. **Atmospheric turbulence and radio wave propagation**, Nauka, p. 166–178, 1967.

MATHIEU, J.; SCOTT, J. **An Introduction to Turbulent Flow**. New York: Cambridge University Press, 2000. ISBN 9780521775380.

MIRONOV, M. A.; BELYAEV, I. V.; KOPIEV, V.; SOROKIN, A. A. An experimental study of reducing narrowband noise of a slat using chevrons. **Acoustical Physics**, v. 58, n. 4, p. 435–443, 2012.

MUELLER, T. J. (Ed.). **Aeroacoustic Measurements**. Berlin: Springer, 2002. (Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics).

MURALI, A. R. *et al.* Noise radiation and dynamics of slat cove vortices revisited in light of a parametric lbm study. *In: 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. Rome, Italy: [s.n.], 2024.

NETO, A. S. **Escoamentos Turbulentos: Análise Física e Modelagem Teórica**. 1. ed. Uberlândia, MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.

PASCIONI, K. A.; CATTAFESTA, L. N. An aeroacoustic study of a leading-edge slat: Beamforming and far field estimation using near field quantities. **Journal of Sound and Vibration**, v. 429, p. 224–244, 2018.

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 9780521598866.

POWELL, C.; FIELDS, J. **Human Response to Aircraft Noise**. [S.l.], 1992. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19920005562/downloads/19920005562.pdf>.

PROENÇA, A. R. **Aeroacoustics of isolated and installed jets under static and in-flight conditions**. 2018. Tese (Doutorado) — University of Southampton, 2018.

RACKL, R.; SIDDON, T. E. Causality correlation analysis of flow noise with fluid dilatation as source fluctuation. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 65, n. 5, p. 1147–1155, 1979.

RAFFEL, M.; WILLERT, C. E.; WERELEY, S. T.; KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry: a practical guide**. 2nd. ed. Berlin: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-72308-0.

RAKHSHANI, B.; FILIPPONE, A. Noise from high-lift leading-edge device. *In: 24th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. San Francisco, California, USA: [s.n.], 2006.

RAO, K. R.; KIM, D. N.; HWANG, J. J. **Fast Fourier Transform: Algorithms and Applications**. Dordrecht: Springer, 2010. (Signals and Communication Technology). ISBN 978-1-4020-6628-3.

RICHARDSON, L. F. **Weather Prediction by Numerical Process**. Cambridge: Cambridge University Press, 1922.

ROCKWELL, D.; NAUDASCHER, E. Self-sustaining oscillations of flow past cavities. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 11, p. 67–94, 1979.

ROGER, M.; PÉRENNÈS, S. Low-frequency noise sources in two-dimensional high-lift devices. *In: 6th Aeroacoustics Conference and Exhibit*. Lahaina, HI: [s.n.], 2000.

ROGERS, M. M.; MOSER, R. D. The three-dimensional evolution of a plane mixing layer: The kelvin–helmholtz rollup. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 243, p. 183–226, 1992.

ROSSITER, J. E. **Wind-Tunnel Experiments on the Flow Over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds**. [S.l.], 1964.

SCHMIDT, O. T.; COLONIUS, T. Guide to spectral proper orthogonal decomposition. **AIAA Journal**, v. 58, n. 3, p. 1023–1033, 2020.

SIEGEL, L.; EHRENFRIED, K.; WAGNER, C.; MULLENERS, K.; HENNING, A. **Cross-correlation analysis of synchronized PIV and microphone measurements of an oscillating airfoil**. 2018. 381–395 p.

SILVA, F. D. da *et al.* Decomposition of surface pressure from jet-wing interaction. *In: Proceedings of the 28th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2025)*. Curitiba, PR, Brazil: [s.n.], 2025.

SIROVICH, L. Turbulence and the dynamics of coherent structures. i. coherent structures. **Quarterly of Applied Mathematics**, Brown University, v. 45, n. 3, p. 561–571, 1987.

SMITH, A. M. O. High-lift aerodynamics. **Journal of Aircraft**, v. 12, p. 501–530, 1975.

SOUZA, D. S.; RODRÍGUEZ, D.; HIMENO, F. H. T.; MEDEIROS, M. A. F. Dynamics of the large-scale structures and associated noise emission in airfoil slats. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 875, p. 1004–1034, 2019.

TAKEDA, K.; ASHCROFT, G. B.; ZHANG, X.; NELSON, P. A. Unsteady aerodynamics of slat cove flow in a high-lift device configuration. *In: 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, NV, USA: [s.n.], 2001.

TERRACOL, M.; MANOHA, E.; LEMOINE, B. Investigation of the unsteady flow and noise generation in a slat cove. **AIAA Journal**, v. 54, n. 2, p. 469–489, feb 2016. ISSN 1533-385X.

UKEILEY, L. **Dynamics of Large Scale Structures in a Plane Turbulent Mixing Layer**. 1995. Ph.D. thesis — Clarkson University, 1995.

WELCH, P. D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. **IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics**, v. 15, n. 2, p. 70–73, 1967.

WILD, J.; POTT-POLLENSKE, M.; NAGEL, B. An integrated design approach for low-noise high-lift devices. *In: AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS. Proceedings of the 3rd AIAA Flow Control Conference*. [S.l.], 2006.

YU, Y.; ZORUMSKI, W. A review of airframe noise research: Successes, challenges, and future directions. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 33, n. 12, p. 655–687, 1997.

ZHANG, Y.; CATTAFESTA, L.; PASCIONI, K.; CHOUDHARI, M. Slat noise in high-lift systems. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 146, p. 100996, 2024.