

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Medições de impedância acústica de liners com escoamento tangencial e elevado NPS: uma visão geral do rig de teste do LVA/UFSC

Quintino, N. T.¹; Bonomo, L. A.²; Spillere, A. M. N.; Cordioli, J. A.³

Laboratório de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, ¹ nicolas.quintino@lva.ufsc.br,

² lucas.bonomo@lva.ufsc.br, ³ julio.cordioli@ufsc.br

Resumo

Liners acústicos utilizados em aeronaves turbofan para atenuar o ruído do fan são representados pela sua impedância acústica. Sabe-se que essa impedância acústica varia com as condições operacionais, como o escoamento tangencial e o nível de pressão sonora. Existem vários métodos experimentais para medir a impedância acústica de liners sob essas condições, o que requer rigs de teste especializados. Este artigo apresenta uma visão geral do rig de teste do LVA/UFSC, que permite medições de impedância acústica com escoamento tangencial com número de Mach médio até 0,6 e nível de pressão sonora até 150 dB. Técnicas de medição in-situ já bem conhecidas são comparadas com os chamados métodos de educação, onde o campo acústico medido ao longo do duto é utilizado para extrair a impedância acústica do liner, baseada em modelos de propagação. As principais vantagens de cada método serão destacadas através da comparação de resultados.

Palavras-chave: *Liners*, impedância acústica, bancada de medições.

PACS: 43.28.-g, 43.58.-e, 43.58.Bh.

Acoustic Liner Impedance Measurements with Grazing Flow and High SPL: an Overview of the LVA/UFSC Test Rig

Abstract

Acoustic liners used on turbofan aeroengines to fan noise suppress are represented by its acoustic impedance. This acoustic impedance is known to vary with operational conditions, such as grazing flow speed and sound pressure level. Several experimental methods for measuring the acoustic impedance of liners under such conditions, which requires specialized test rigs. This paper presents an overview of the LVA/UFSC Test Rig, which allows measurements of acoustic impedance with grazing flow with average Mach number up to 0.6 and sound pressure level up to 150 dB. The well known in-situ impedance measurement techniques is compared to the so-called education methods, where the acoustic field measured along the duct is used to extract the acoustic liner impedance, based on propagation models. The main advantages of each method will be highlighted along the comparison of the results.

Keywords: Liners, acoustic impedance, test rig.



1. INTRODUÇÃO

Liners acústicos são comumente utilizados para atenuação de componentes tonais e de banda larga em aeronaves *turbopan*. A geometria típica de *liners* consiste de uma estrutura colmeia de abelha entre uma placa rígida e outra perfurada. Eles são geralmente representados por sua impedância acústica, e por isso estimativas precisas deste parâmetro são necessárias. A impedância acústica de *liners* depende de sua geometria (como largura da cavidade, porcentagem de área aberta e diâmetro dos furos) e condições de operação (como nível de pressão sonora (NPS) e número de Mach do escoamento tangencial [1]).

Embora a impedância acústica seja simplesmente definida pela razão da pressão acústica complexa e a velocidade acústica normal de partícula complexa, ambas na superfície da placa perfurada, medir essas quantias não é um trabalho trivial. Dean [2] propôs inicialmente a instalação de um par de microfones na superfície da placa perfurada e no fundo da cavidade de uma mesma célula da estrutura colmeia, mostrado esquematicamente na Figura 1. Uma relação simples pode ser derivada para o campo acústico dentro da célula, no qual a impedância do *liner* pode ser inferida da pressão acústica complexa na placa perfurada e no fundo da cavidade. Em geral, a placa perfurada não é sempre perfeitamente alinhada com as paredes da colmeia de tal modo que cada célula possa ter pequenas diferenças de porcentagem de área aberta, e conseqüentemente uma diferente impedância acústica.

Por isso, um grupo de métodos experimentais indiretos foi desenvolvido durante as últimas décadas (como [3–6]). As chamadas técnicas de educação de impedância consistem na medição do campo acústico dentro do duto e a consideração de equações governantes e condições de contorno adequadas. Estes métodos podem ser divididos em dois subgrupos. Métodos inversos de educação são baseados na otimização da diferença entre o campo acústico medido e o calculado numericamente com uma estimativa da impedância [3]. Os métodos diretos de educação permitem a avaliação da impedância através da extração do número de onda da seção tratada utilizando algoritmos tipo Prony [7].

Neste trabalho, nós comparamos a técnica do *in-situ* e as técnicas de educação de impedância com elevado escoamento tangencial e NPS, para números de Mach médio do escoamento tangencial até 0,5 e NPS na placa perfurada do *liner* até 145 dB e para a fonte a montante e a jusante do *liner*. Para a técnica do *in-situ*, serão mostrados métodos de instrumentação com *probes* capilares com microfones em miniatura. Para os métodos inversos de educação, um modelo numérico do campo acústico é computado usando o método de acoplamento modal. Também, uma técnica direta de educação de impedância baseada no algoritmo de Kumaresan e Tufts (KT) [8] é utilizada.

Na Seção 2, descrevemos em detalhes as técnicas experimentais. Na Seção 3, apresentamos a bancada experimental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Na Seção 4, são mostrados os resultados e é discutida a diferença observada entre os métodos. Por último, as conclusões são destacadas na Seção 5.

2. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

2.1 Técnica *in-situ*

A técnica de medição *in-situ* estima a velocidade de partícula na placa perfurada e a impedância da célula utilizando as medições de pressão acústica na placa perfurada e o fundo da cavidade. As principais hipóteses assumidas na técnica são: (i) o fundo da cavidade é totalmente refletivo, e (ii) somente ondas planas existem na célula da colmeia de abelha. Com essas condições, pode ser demonstrado que a impedância do *in-situ* é dada por [2]

$$Z = \frac{-iH_{fb}}{\sin(kh)}, \quad (1)$$

onde Z é a impedância acústica específica normalizada por $\rho_0 c_0$, $i = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária, H_{fb} é a razão entre as pressões acústicas complexas na placa perfurada e no fundo da cavidade, $k = \omega/c_0$ é o número de onda de campo livre e h é a altura da cavidade.

A técnica *in-situ* assume implicitamente que o *liner* é localmente reativo, e nenhuma suposição sobre o escoamento fora do *liner* é feita. Portanto, ela não depende da definição de uma condição de contorno como a condição de Ingard-Myers [9, 10] já que não tenta modelar o campo acús-

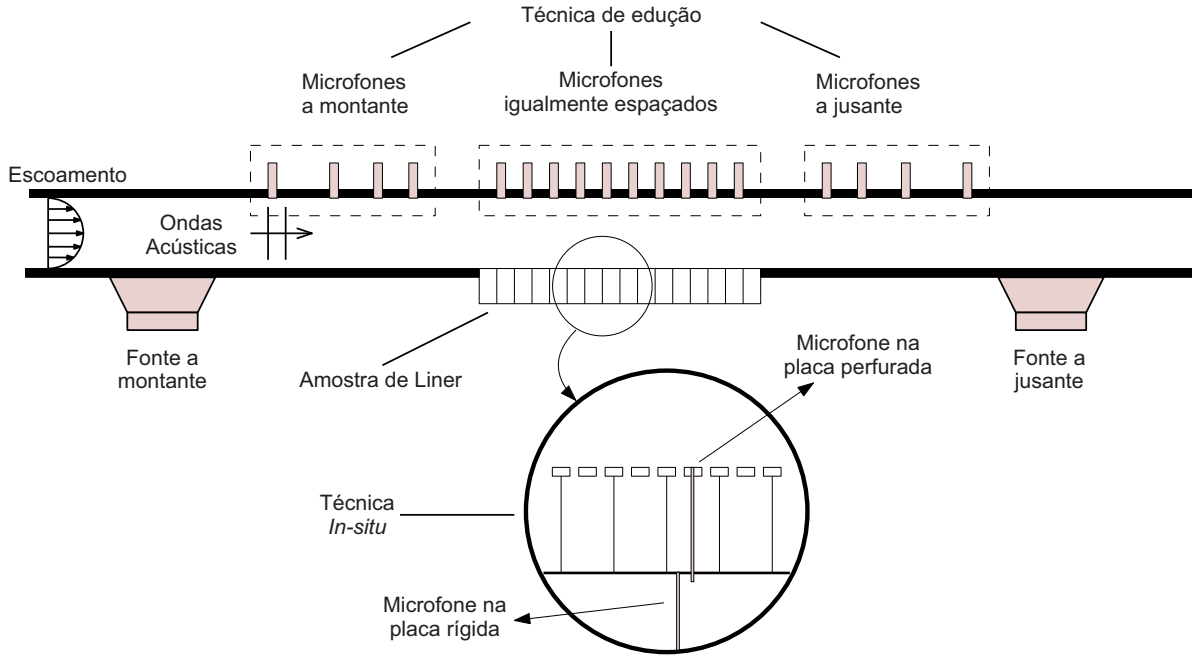


Figura 1: Vista esquemática da bancada para educação de impedância.

tico como realizado nas técnicas de educação de impedância

2.2 Educação de impedância

Para as técnicas inversas de educação de impedância, é necessário um modelo numérico do campo acústico dentro do duto. Métodos de elementos-finitos e de Galerkin descontínuo são usualmente aplicados para simular o domínio inteiro (Watson e Jones [3] and Roncen *et al.* [6]). Entretanto, podemos utilizar a vantagem da estrutura modal do campo acústico para computar soluções mais rápidas, que são particularmente importantes para a aplicação de rotinas iterativas usadas para eduzir a impedância do *liner*. Neste contexto, o método de acoplamento modal pode reproduzir soluções obtidas com elementos-finitos [11]. Neste trabalho, uma técnica de acoplamento modal será utilizada para acoplar soluções da equação convectiva de Helmholtz 2D nas interfaces rígidas/com *liner* do duto.

2.2.1 Equações governantes

São consideradas como coordenadas do sistema a direção x na mesma direção da largura do duto e a direção z na direção do escoamento. Assume-se um escoamento paralelo na direção positiva de z assim a perturbação da pressão acústica $p \propto \hat{p} \exp(i\omega t - ik_z z)$ é governada pela equação

convectiva de Helmholtz,

$$(\nabla_{\perp}^2 + (k - Mk_z)^2 - k_z^2) \hat{p} = 0, \quad (2)$$

sendo $M \equiv U/c_0$ o número de Mach médio do escoamento, e k_z o número de onda axial. Neste trabalho, pode ser desprezada a propagação da onda na direção y na faixa de frequências de interesse [11], para que $\nabla_{\perp}^2 \equiv \frac{d^2}{dx^2}$. Em $x = W$, correspondendo a parede rígida a condição de contorno implica em $\frac{d\hat{p}}{dx} = 0$. Em $x = -W$, correspondendo a parede com *liner* é assumida a condição de contorno de Ingard–Myers,

$$\frac{d\hat{p}}{dx} = \frac{i}{kZ} (k - Mk_z)^2 \hat{p}. \quad (3)$$

2.2.2 Método do acoplamento modal

Em cada seção j , o campo acústico $p(x, z)$ pode ser aproximado por uma soma de $\mathcal{N}$ modos acústicos. Para determinar os números de onda axiais e as formas modais de cada seção, reescrevemos a equação convectiva de Helmholtz de forma apropriada, que então pode ser resolvida como um problema de autovalor, mais detalhes dessa resolução podem ser encontrados em Spillere *et al.* [11]. Com os autovalores e autovetores conhecidos, as amplitudes modais podem ser determinadas ao igualar a massa e o momento em cada interface [12].



O procedimento de educação de impedância descrito é iterativo: uma estimativa inicial é necessária para computar o campo acústico numérico p_q^{num} para cada local de microfone z_q , que pode ser comparado com o campo acústico medido p_q^{exp} por meio da seguinte função custo

$$\mathcal{F}(Z) = \sum_{q=1}^8 \left| \frac{p_q^{\text{exp}} - p_q^{\text{num}}(Z)}{p_q^{\text{exp}}} \right|. \quad (4)$$

O algoritmo de Levenberg–Marquadt [13, 14] é utilizado para minimizar essa função custo, a qual resulta na impedância do *liner*. Para melhor convergência, modelos de impedância semi-empíricos (por exemplo Murray e Astley [1]) são utilizados como estimativa inicial para a impedância do *liner*. As entradas para esse procedimento são as amplitudes de ondas planas se propagando em direção a seção com o *liner*.

2.2.3 Método direto por algoritmo KT

Neste trabalho, o algoritmo KT é utilizado para extrair o número de onda axial a partir das medições dos microfones. O algoritmo consiste em ajustar uma combinação linear de exponenciais complexas amortecidas para a pressão medida em locais igualmente espaçados. Para microfones rentes a parede do lado oposto ao *liner*, a pressão acústica pode ser simplesmente escrita por

$$p_m(z) = \sum_{n=1}^{\mathcal{N}} (A_n^{\pm} \exp(-ik_{z,n}^{\pm} m \Delta z)) \quad (5)$$

para $m = 0, 1, \dots, \mathcal{M} - 1$, sendo p_m a pressão acústica no m -ésimo microfone, Δz a distância entre dois microfones consecutivos e $\mathcal{M}$ o número de microfones posicionados na seção com *liner*.

3. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1 Rig de testes de liners da UFSC

O rig de testes de liners da UFSC é composto por cinco seções modulares contendo alto-falantes, microfones e porta amostra, como pode ser visto na Figura 2. Um sistema de ar comprimido fornece escoamento tangencial com número de Mach até 0,6. Fontes acústicas são dispostas em ambos os lados a montante e a jusante do porta amostra, permitindo a propagação acústica na mesma direção e contra o escoamento. A seção de testes

possui área transversal retangular com 40 mm de altura e 100 mm de largura, e terminações anecoicas são localizadas a montante e a jusante da seção de teste, com coeficiente de reflexão abaixo de 0,2 na faixa de frequências de interesse e sem a presença de escoamento.

Dois arranjos de quatro microfones B&K 4944-A 1/4" rentes a parede rígida a montante e a jusante ao porta amostra permitem a medição do campo acústico para os métodos iterativos de educação. Outro arranjo de oito microfones rentes a parede são posicionados na parede rígida do lado oposto a amostra de *liner*, para o método de educação baseado no algoritmo KT. Os microfones são posicionados no centro da largura do duto, o que permite a medição de apenas ondas planas abaixo do segundo modo da frequência de corte ao longo da largura do duto. Para as medições do *in-situ*, um par de *probes* de tubos capilares instrumentados com microfones B&K 4944-A 1/4" é utilizado. Quatro alto falantes beyrna CP-855Nd são posicionados em ambos os lados da seção de teste. O sinais de excitação são amplificados por amplificadores B&K 2716-C.

Os sinais dos microfones são adquiridos com frequência de amostragem de 25,6 kHz, simultaneamente com a geração da excitação em um sistema PXI da National Instruments, controlado por um código desenvolvido em Python3. Dados são processados com o método de Welch, 30 médias de 25600 amostras com 75 % de sobreposição. Uma janela *flat-top* é utilizada, para garantir precisão da amplitude tonal. Um retorno do sinal de excitação é utilizado como uma referência sem ruído para a estimativa do espectro cruzado das componentes de ruído.

Ambos os microfones de educação e *in-situ* instrumentados são calibrados em amplitude e fase em relação a um microfone de referência ao expor eles ao mesmo campo acústico [15]. Esse procedimento é especialmente importante na técnica do *in-situ*, devido a sua alta sensibilidade a mudanças de fase entre os *probes* [16] e será detalhado na Seção 3.4.

A temperatura dentro da seção de teste é medida com um transdutor de temperatura KIMO TM-110. A velocidade de escoamento na entrada da seção de teste é medida por um tubo de Pitot com

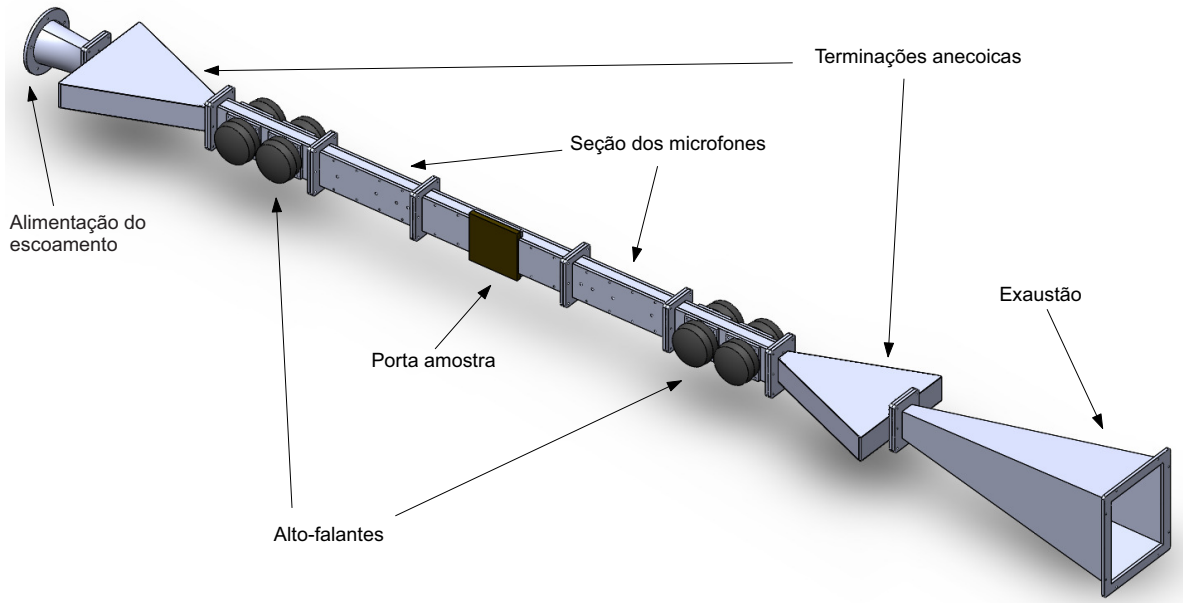


Figura 2: Representação do rig de testes de liners da UFSC

2 mm de diâmetro, conectado a um transdutor diferencial de pressão KIMO CP-115. O número de Mach médio na seção de teste é conhecido por um fator pré-calibrado, determinado por um método de quadratura média[17].

3.2 Amostra de teste

Neste estudo, será utilizada uma amostra típica de um grau de liberdade para os experimentos. A amostra possui uma espessura de placa perfurada de 1 mm, porcentagem de área aberta de 7,4 % com furos de 1 mm de diâmetro e altura da estrutura de colmeia de abelha de 48,6 mm. O liner tem uma largura nominal de 210 mm.

3.3 Condições de teste

Neste trabalho, as seguintes condições de teste serão consideradas. As fontes acústicas serão ajustadas para alcançar um NPS de 130 dB e 145 dB na placa perfurada da célula instrumentada para as medições do *in-situ* da amostra de liner. Para garantir o máximo NPS na placa perfurada, a amostra é rotacionada para que a célula instrumentada fique sempre o mais próxima possível da fonte sonora. Os testes serão conduzidos sem escoamento e com escoamento tangencial com número de Mach médio de 0,3 e 0,5, na seção do porta amostra. É utilizado um seno de tom puro numa faixa de frequências de 0,5 kHz e 3 kHz com um passo de 0,125 kHz.

3.4 Instrumentação do método *in-situ*

Devido à alta sensibilidade da metodologia do *in-situ*, um procedimento sistemático para compensar qualquer mudança de amplitude e fase entre o par de *probes* é importante. Isso é especialmente necessário para os *probes*, desde que os tubos capilares têm sua própria função de resposta em frequência.

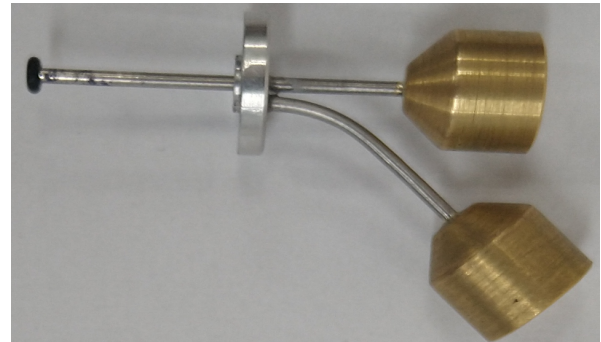


Figura 3: Probes de tubo capilar utilizados na técnica *in-situ*

Neste trabalho, seguimos a abordagem de Krishnappa [15], a qual é baseada na exposição do par de microfones a um mesmo campo acústico e então utilizamos a função resposta em frequência entre os dois sinais adquiridos como correção para o medido H_{fb} . Isto foi realizado ao posicionar os microfones na terminação rígida de um tubo acústico, como mostrado na Figura 4. Um microfone de referência também é posicionado no fim do duto para que o *probe* da placa perfu-



rada possa ser calibrado em relação a amplitude absoluta, que permite avaliar o NPS no ponto de medição. O duto tem diâmetro de 25,4 mm e 1 m de comprimento, o que garante somente a propagação de ondas planas na direção dos microfones. As funções resposta em frequência são obtidas por meio do estimador H_1 [18, p.350] utilizando tonais puros como nas medições, porém com 300 médias de 25600 com 75 % de sobreposição.

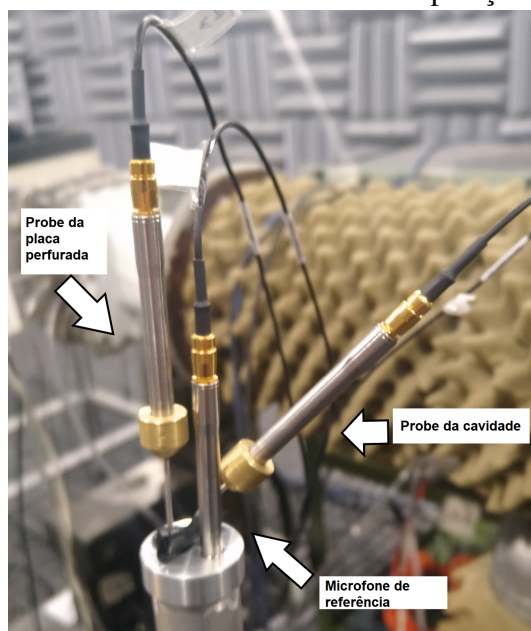
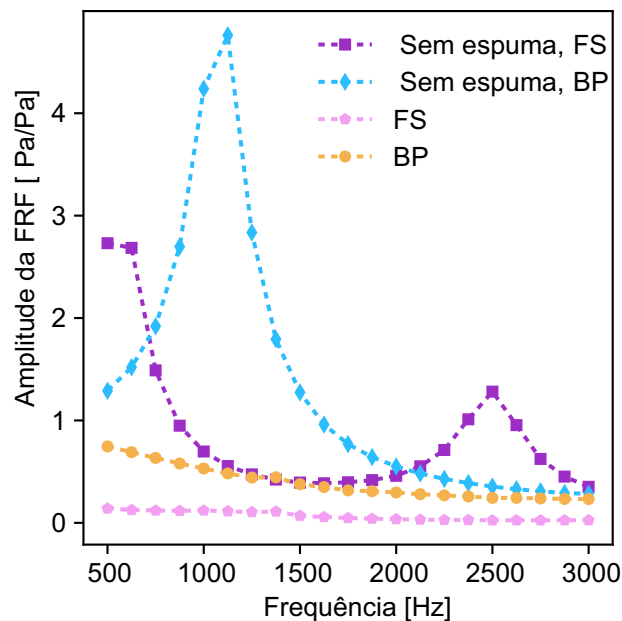


Figura 4: Calibração do par de *probes*

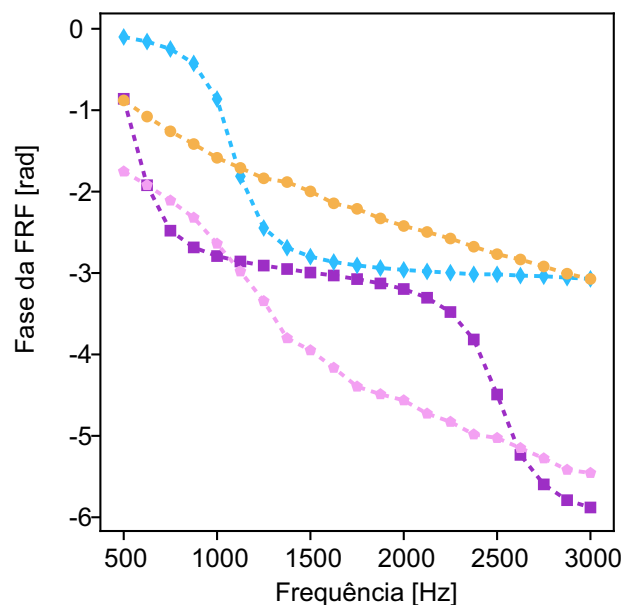
Os *probes* de tubos capilares são similares a um tubo aberto-fechado. Portanto, são esperadas ressonâncias nas frequências próximas a múltiplos ímpares de um quarto do comprimento de onda. Nessas condições, avaliar com precisão a função resposta em frequência se torna difícil. Uma alternativa é posicionar material absorvivo dentro do tubo. Neste trabalho, foi colocada espuma acústica no quarto final do tubo próximo ao microfone, onde é esperado que a pressão acústica seja a mais alta na ressonância. As funções resposta em frequência com o microfone de referência de referência para o estimador H_1 para um par de *probes* com e sem espuma pode ser visto na Figura 5. A espuma foi inserida em todas as medições de impedância subsequentes.

É esperado que a célula do *liner* se comporte como uma cavidade rígida. Portanto, é necessário garantir que a célula instrumentada está vedada, senão vazamentos de pressão podem levar a resultados inesperados, especialmente nas baixas frequências, já que a impedância da cavidade é

esperada que seja sua componente dominante[19]. Por isso, os suportes utilizados para os *probes*, foram colados à amostra com epóxi.



(a)



(b)

Figura 5: Função resposta em frequência do par de *probes* com e sem espuma. FS (facesheet) é o da placa perfurada e tem 70 mm de comprimento. BP (backplate) é o *probe* curvado do fundo da cavidade e seu comprimento é aproximadamente 30 mm.

A instrumentação da célula do *liner* implica em uma redução do seu volume e um aumento da velocidade acústica na placa perfurada. Discrepâncias observadas na reatância medida quando comparada com modelos preditivos semi-empíricos

podem ocorrer por esse efeito ou por problemas de vazamento. Uma correção para esses efeitos foi reportada por Ferrante *et al.* [16], que é aplicada em toda a impedância acústica, embora parte da reatância esteja relacionada as reflexões do fundo que dependem somente da altura de cavidade. Assim, um procedimento alternativo é proposto na aplicação da correção. A impedância da cavidade, é dada por $-i \cot(kh)$, é inicialmente subtraída da medição de impedância, para que a impedância restante esteja relacionada à placa perfurada. Então, as correções são aplicadas, e a impedância da cavidade é introduzida novamente, que pode ser escrita como

$$z_{\text{corrigido}} = \frac{z_{\text{meas}} + i \cot(kh)}{1 - \varepsilon_w - \varepsilon_m} + i \frac{\varepsilon_m}{\tan(kh)} - i \cot(kh). \quad (6)$$

Sendo z_{meas} a impedância obtida da Equação (1), ε_w a razão entre de metade da área das paredes em volta das células e a área da célula do *liner*, ε_m é a razão entre o volume bloqueado devido à instrumentação e o volume da célula.

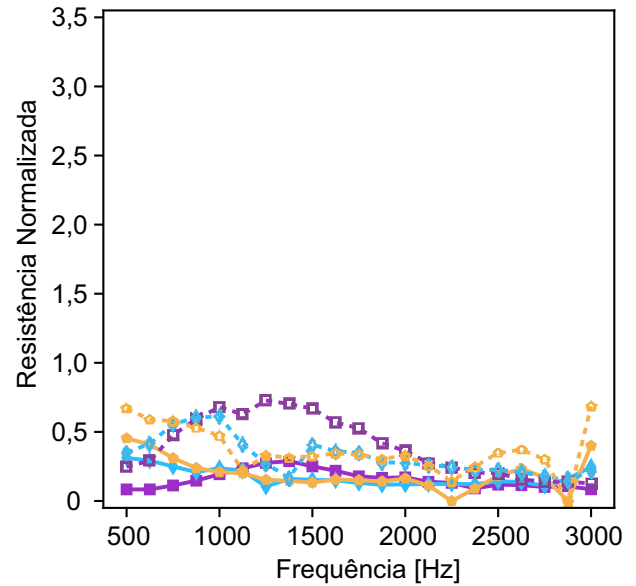
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os principais resultados obtidos para este trabalho serão apresentados. Uma discussão sobre como as diferentes condições de operação afetam o valor experimental medido por cada método será apresentada, especialmente em relação ao NPS, que pode variar de um método para outro.

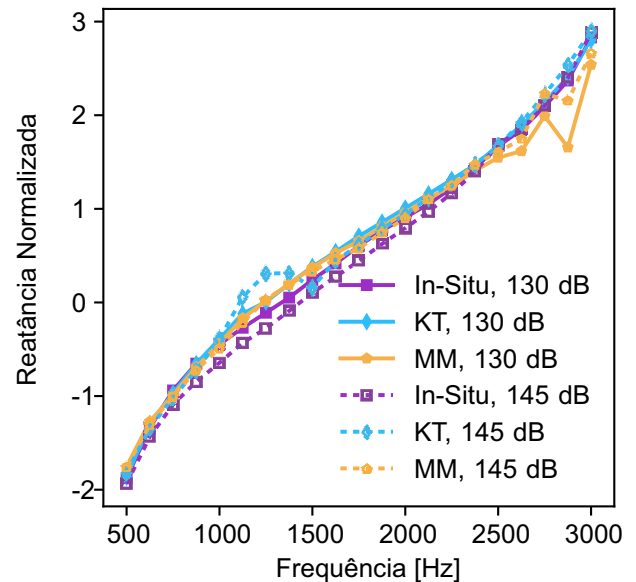
4.1 Resultados sem escoamento

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para os 3 métodos considerados neste trabalho. Boa concordância é observada entre os 3 métodos, embora as curvas de resistência apresentem uma inclinação para as baixas frequências, ao contrário das curvas mais plana para os resultados *in-situ*. Essa inclinação é comumente observada nas técnicas de educação[4, 20].

É esperado que o aumento do NPS induza um aumento da resistência do *liner* devido aos efeitos não lineares na placa perfurada estarem mais presentes. Também, que a componente não-linear seja reduzida com o aumento da porcentagem de área aberta[1]. As tendências observadas com os resultados do *in-situ* ao comparar 130 dB e 145 dB na placa perfurada segue àquelas reportadas na literatura, que são um aumento na resistência e



(a) Figura A



(b) Figura B

Figura 6: Resultados obtidos sem escoamento e diferente NPS.

uma redução da reatância próximas a ressonância (por exemplo os resultados na Ref. [16]). Essas mudanças podem ser explicadas por uma maior velocidade de partícula nessas frequências[1].

Pode-se notar que o efeito do alto NPS é mais notável para os resultados do *in-situ*. Isso ocorre pois a impedância local é obtida ao utilizar a técnica do *in-situ*. Ainda, as técnicas de educação avaliam uma impedância média para todo o comprimento da amostra, e como o campo acústico é atenuado ao longo do *liner*, é esperada uma menor resistência. Os resultados para o algoritmo KT ilustram isso. Embora boa concordância seja ob-



servada entre os resultados do algoritmo KT e do método *in-situ* com 145 dB, próximo a frequência de ressonância a resistência obtida com o algoritmo KT decai. Esse decaimento pode ser explicado pelo fato do NPS ao longo da amostra reduzir rapidamente devido à atenuação do *liner* próximo a ressonância, assim a resistência média eduzida é menor que a obtida pelo método *in-situ*. O NPS para os microfones utilizados para o algoritmo KT nas medições com 145 dB é apresentado na Figura 7. Uma alternativa para lidar com esse decaimento ao longo da direção é considerar um modelo de impedância associado com a técnica de educação, para que a variação espacial da impedância seja considerada, um método similar foi aplicado recentemente por Roncen *et al.* [21].

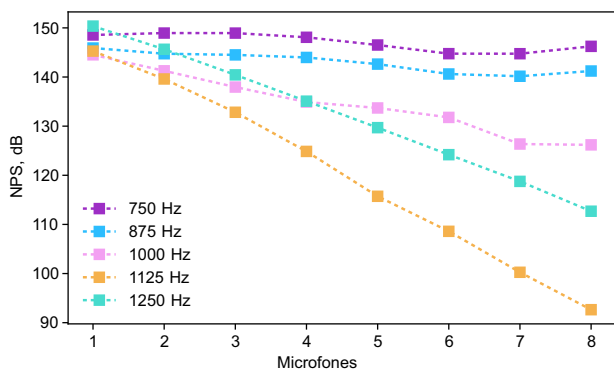


Figura 7: NPS dos microfones na parede oposta ao *liner*.

A Figura 8 apresenta o NPS das ondas planas incidentes propagando na direção do *liner*, obtidos por meio da decomposição de ondas planas, e o NPS no *probe* da placa perfurada.

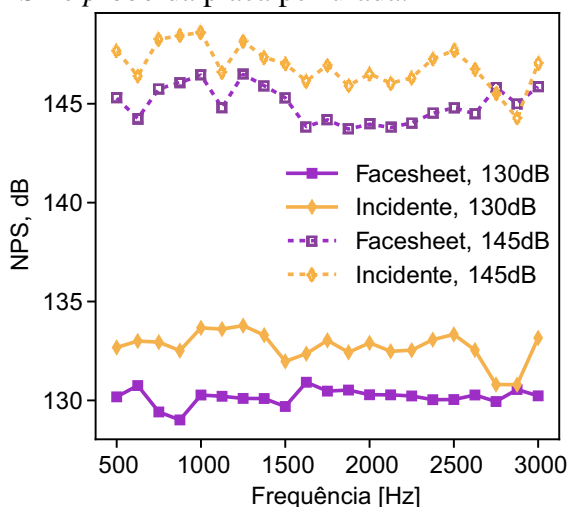


Figura 8: NPS da onda plana incidente e do *probe* na placa perfurada.

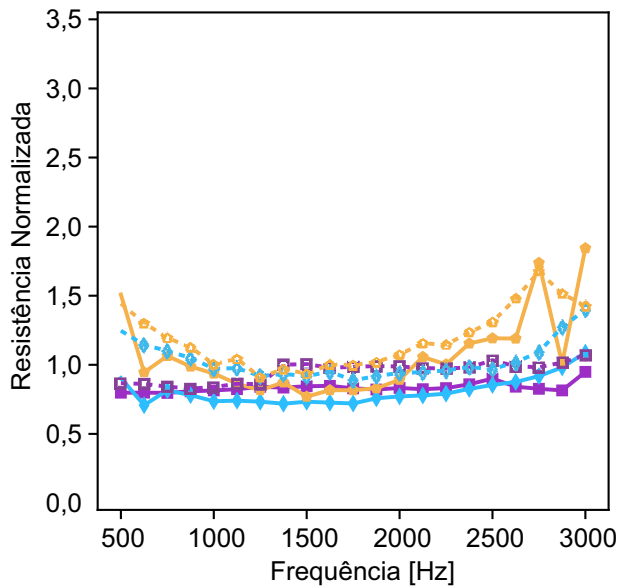
Outro fenômeno relacionado ao NPS pode ser observado nos resultados. O NPS na placa perfurada é inferior ao NPS incidente, o que pode fazer com que em alguns casos o NPS desejado na placa não seja atingido apesar do incidente estar mais elevado. Isso ocorre devido a maior absorção que ocorre próximo a ressonância do *liner*, assim o NPS máximo na superfície da célula é reduzido.[1].

4.2 Resultados com escoamento tangencial

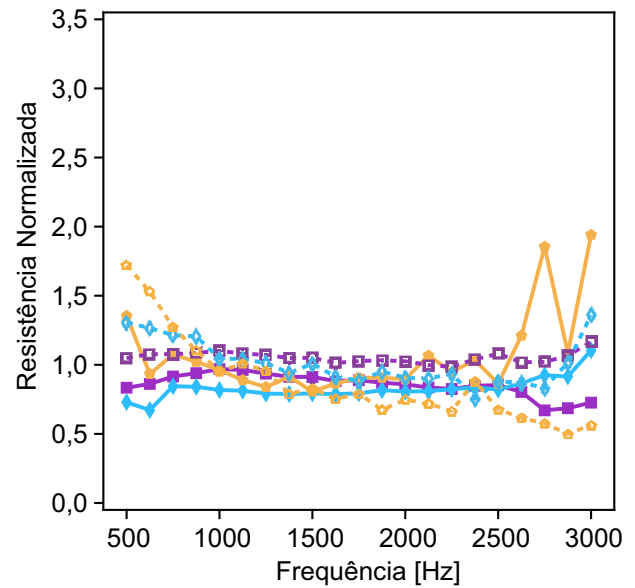
As Figuras. 9, 10, 11 e 12 mostram os resultados obtidos, com número de Mach médio de 0,3 e 0,5. Os resultados são apresentados para ambas as condições de fonte a montante e a jusante, e para ambos NPS na placa perfurada de 130 e 145 dB.

Os resultados obtidos mostram boa concordância para a reatância, com exceção para as baixas frequências com fonte a montante e o algoritmo KT e para as frequências mais altas nas técnicas inversas de educação, especialmente com $M = 0,5$. Entretanto, a tendência observada nas baixas frequências seguem o comportamento notado em discrepâncias documentadas observadas entre a propagação com fonte a montante e a jusante [4, 22]. As maiores discrepâncias observadas com a educação de impedância baseada no método do acoplamento modal (MM) para número de Mach 0,5 podem ser explicadas pelas distâncias de propagação acústica mais longas consideradas, o que pode aumentar a diferença de fase devido a hipótese de escoamento uniforme em ambas as seções rígidas e com *liner*.

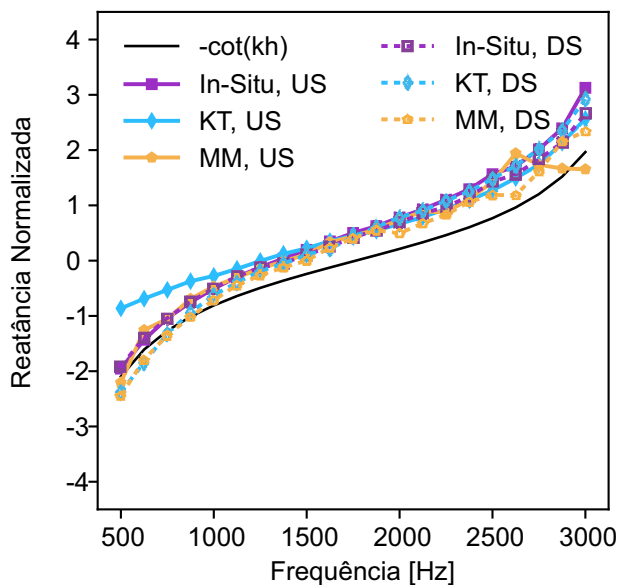
As resistências eduzidas com ambas as técnicas de educação seguem as tendências apresentadas pela diferença observada para fontes a montante e a jusante [4, 22], embora não apresentem concordância com outros métodos. A resistência avaliada pela técnica do *in-situ* também apresenta uma diferença com o sentido de propagação. Nesse caso, a tendência observada é uma maior resistência para a fonte a jusante. Uma hipótese que pode explicar estas resistências elevadas é que o sentido de propagação do escoamento afeta a refração da camada limite [23], portanto a impedância efetiva da célula instrumentada pode variar com a posição da fonte acústica.



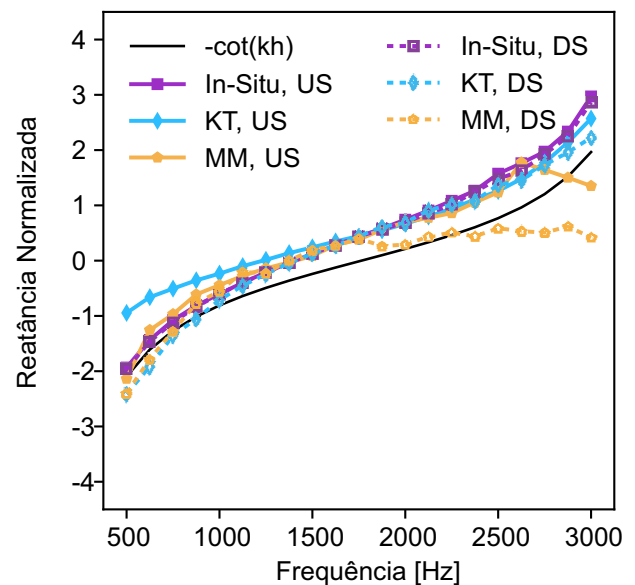
(a)



(a)



(b)



(b)

Figura 9: Resultados obtidos para Mach médio 0,3 e 130 dB. US (*upstream*) é a fonte a montante e DS (*downstream*) é a fonte a jusante.

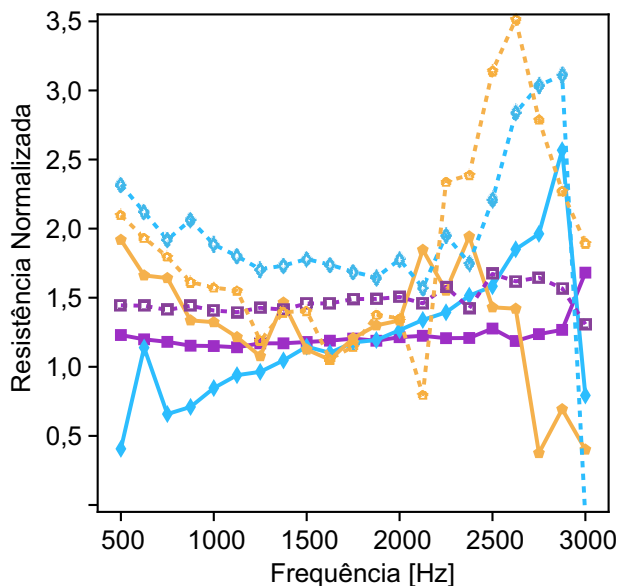
5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, três técnicas experimentais para a medição da impedância acústica de *liners* com escoamento tangencial foram comparadas. A técnica *in-situ*, permite a medição da impedância local, e duas técnicas de educação, uma inversa, baseada no acoplamento modal, e uma de educação direta, baseada na extração do número de onda por meio do algoritmo KT, foram considerados. Os três métodos foram aplicados para uma amostra típica de *liner*, utilizando as instalações do *rig* de teste da UFSC, que permitiu a realização da

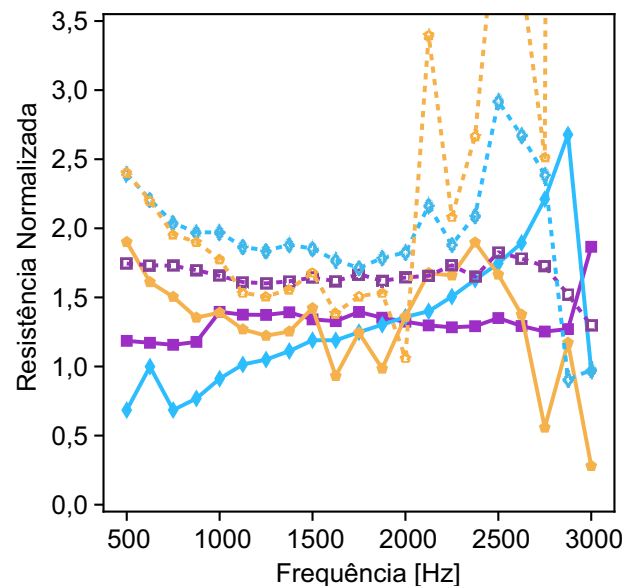
Figura 10: Resultados obtidos para Mach médio 0,3 e 145 dB.

medição para os três métodos ao mesmo tempo.

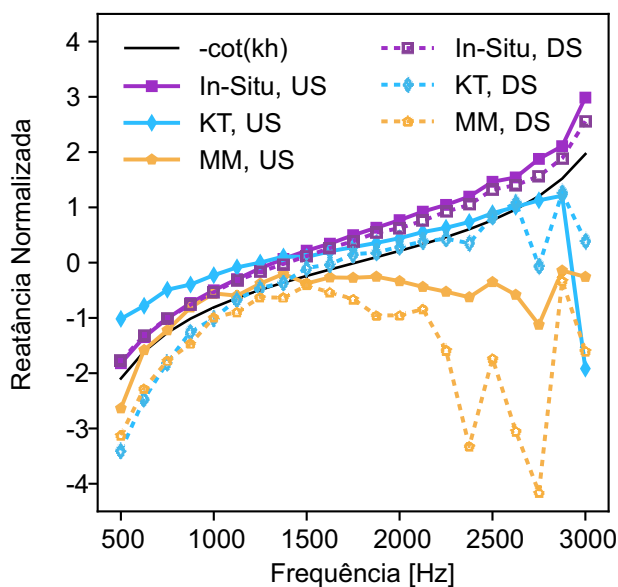
Uma discussão sobre a instrumentação da amostra para a técnica do *in-situ* é realizada. A apresentação de *probes* com tubo capilares e seus cuidados é realizada, a necessidade da calibração devido a sua função resposta em frequência e sua preparação para evitar grandes variações por causa da sua ressonância. A instrumentação com *probes* apresenta boa concordância com modelos semi-empíricos, devido principalmente a uma melhor vedação. Também, o método para compensar efeitos de instrumentação na impedância medida é apresentado.



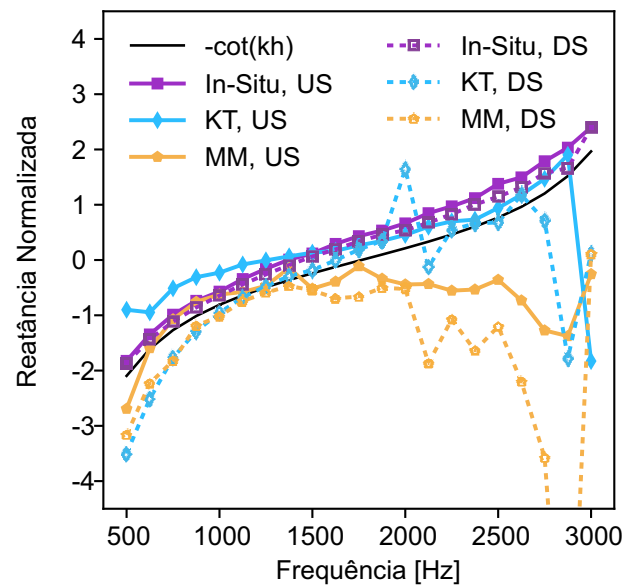
(a)



(a)



(b)



(b)

Figura 11: Resultados obtidos para Mach médio 0,5 e 130 dB

Boa concordância entre os três métodos é encontrada na falta de escoamento e baixo NPS na placa perfurada. Para maiores NPS, os efeitos não lineares estão mais presentes nos resultados do *in-situ*, já que os métodos de educação de impedância avaliam uma impedância média ao longo da amostra de *liner*, assim a atenuação sonora induz a menores resistências como resultado para esses métodos.

Nos casos com a condição de escoamento tangencial, é difícil obter uma única conclusão a partir dos resultados. A diferença entre os resultados com fonte a montante e a jusante são mais per-

Figura 12: Resultados obtidos para Mach médio 0,5 e 145 dB.

ceptíveis entre os métodos de educação, apesar de estar presente na técnica do *in-situ*. O aumento do número de Mach e NPS geralmente leva a uma maior dispersão dos resultados para todos os métodos, mas os resultados do *in-situ* aparentam serem os menos afetados. Todavia, as discrepâncias entre os resultados de fonte a montante e a jusante fica maior com o aumento do número de Mach e NPS. Isso evidencia a importância de investigação futura na física de *liners* com escoamento tangencial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das seguintes instituições: FINEP, CAPES, CNPq e EMBRAER S.A..

REFERÊNCIAS

- [1] Murray, Paul e Astley, R. Jeremy. Development of a single degree of freedom perforate impedance model under grazing flow and high SPL. Em *18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. doi: [10.2514/6.2012-2294](https://doi.org/10.2514/6.2012-2294).
- [2] Dean, P.D. An in situ method of wall acoustic impedance measurement in flow ducts. *Journal of Sound and Vibration*, 34(1):97 – 106, 1974. doi: [10.1016/S0022-460X\(74\)80357-3](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(74)80357-3).
- [3] Watson, W. R. e Jones, M. G. New numerical procedure for impedance education in ducts containing mean flow. *AIAA Journal*, 49(10):2109–2122, 2011. doi: [10.2514/1.J050317](https://doi.org/10.2514/1.J050317).
- [4] Boden, Hans; Cordioli, Julio A.; Spillere, Andre e Serrano, Pablo. Comparison of the effect of flow direction on liner impedance using different measurement methods. Em *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017. doi: [10.2514/6.2017-3184](https://doi.org/10.2514/6.2017-3184).
- [5] Spillere, André M.N.; Medeiros, Augusto A. e Cordioli, Julio A. An improved impedance education technique based on impedance models and the mode matching method. *Applied Acoustics*, 129:322–334, 2018. doi: [10.1016/j.apacoust.2017.08.014](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.08.014).
- [6] Roncen, R.; Piot, E.; Méry, F.; Simon, F.; Jones, M. G. e Nark, D. M. Wavenumber-based impedance education with a shear grazing flow. *AIAA Journal*, 58(7): 3040–3050, 2020. doi: [10.2514/1.J059100](https://doi.org/10.2514/1.J059100).
- [7] Watson, Willie R.; Carpenter, Mark H. e Jones, Michael G. Performance of Kumaresan and Tufts Algorithm in Liner Impedance Education with Flow. *AIAA Journal*, 53(4):1091–1102, 2015. ISSN 0001-1452. doi: [10.2514/1.j053705](https://doi.org/10.2514/1.j053705).
- [8] Kumaresan, R. e Tufts, D. Estimating the parameters of exponentially damped sinusoids and pole-zero modeling in noise. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 30 (6):833–840, December 1982. ISSN 0096-3518. doi: [10.1109/TASSP.1982.1163974](https://doi.org/10.1109/TASSP.1982.1163974).
- [9] Ingard, U. Influence of fluid motion past a plane boundary on sound reflection, absorption, and transmission. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 31: 1035–1036, 1959. doi: [10.1121/1.1907805](https://doi.org/10.1121/1.1907805).
- [10] Myers, M. K. On the acoustic boundary condition in the presence of flow. *Journal of Sound and Vibration*, 71:429–434, 1980. doi: [10.1016/0022-460X\(80\)90424-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(80)90424-1).
- [11] Spillere, André Mateus Netto; Bonomo, Lucas Araujo; Cordioli, Júlio Apolinário e Brambley, Edward James. Experimentally testing impedance boundary conditions for acoustic liners with flow: Beyond upstream and downstream. *Journal of Sound and Vibration*, 489:115676, 2020. ISSN 0022-460X. doi: [10.1016/j.jsv.2020.115676](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115676).
- [12] Gabard, G. e Astley, R.J. A computational mode-matching approach for sound propagation in three-dimensional ducts with flow. *Journal of Sound and Vibration*, 315(4):1103 – 1124, 2008. ISSN 0022-460X. doi: [10.1016/j.jsv.2008.02.015](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.02.015).
- [13] Levenberg, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2(2):164–168, 1944. doi: [10.1090/qam/10666](https://doi.org/10.1090/qam/10666).
- [14] Marquardt, Donald W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11 (2):431–441, 1963. doi: [10.1137/0111030](https://doi.org/10.1137/0111030).
- [15] Krishnappa, G. Cross-spectral method of measuring acoustic intensity by correcting phase and gain mismatch errors by microphone calibration. *Citation: The Journal of the Acoustical Society of America*, 69: 307, 1981. doi: [10.1121/1.385314](https://doi.org/10.1121/1.385314). Disponível em: <https://doi.org/10.1121/1.385314>.
- [16] Ferrante, Piergiorgio; De Roeck, Wim; Desmet, Wim e Magnino, Nicola. Back-to-back comparison of impedance measurement techniques applied to the characterization of aero-engine nacelle acoustic liners. *Applied Acoustics*, 105:129 – 142, 2016. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2015.12.004](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.12.004).
- [17] ISO 3966:2008 - Measurement of fluid flow in closed conduits — Velocity area method using Pitot static tubes. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2008.
- [18] Shin, Kihong e Hammond, Joseph. *Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers*. John Wiley & Sons, 2008.
- [19] Guess, A. W. Calculation of perforated plate liner parameters from specified acoustic resistance and reactance. *Journal of Sound and Vibration*, 40:119–137, 5 1975. ISSN 10958568. doi: [10.1016/S0022-460X\(75\)80234-3](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(75)80234-3).
- [20] Serrano, Pablo G.; Spillere, André M.; Cordioli, Julio A.; Murray, Paul B. e Astley, R. Jeremy. Comparisons between education and in-situ measurement procedures for aero engine liner impedance. Em *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017. doi: [10.2514/6.2017-3024](https://doi.org/10.2514/6.2017-3024).
- [21] Roncen, Rémi; Méry, Fabien; Piot, Estelle e Klotz, Patricia. Spatially-varying impedance model for locally reacting acoustic liners at a high sound intensity. *Journal of Sound and Vibration*, 524:116741, 2022. ISSN 0022-460X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116741>. Dis-



ponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X21007355>.

- [22] Renou, Ygaäl e Aurégan, Yves. Failure of the ingard–myers boundary condition for a lined duct: An experimental investigation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(1):52–60, 2011. doi: [10.1121/1.3586789](https://doi.org/10.1121/1.3586789).
- [23] Spillere, André M.N.; Braga, Danilo S.; Seki, Leonardo A.; Bonomo, Lucas A.; Cordioli, Julio A.; Rocamora, Bernardo M.; Greco, Paulo C.; Reis, Danilo C. e Coelho, Eduardo L.C. Design of a single degree of freedom acoustic liner for a fan noise test rig:. *International Journal of Aeroacoustics*, 20:708–736, 6 2021. ISSN 20484003. doi: [10.1177/1475472X211023831](https://doi.org/10.1177/1475472X211023831). Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1475472X211023831>.