

ALLAN ROSA PÚBLIO

**COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DO TUBO DE
IMPEDÂNCIA E O MÉTODO *IN SITU* SEM A
UTILIZAÇÃO DE FONTE SONORA PARA A MEDIÇÃO
DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2020

ALLAN ROSA PÚBLIO

COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA E O MÉTODO *IN SITU* SEM A UTILIZAÇÃO DE FONTE SONORA PARA A MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **ENGENHEIRO MECATRÔNICO**.

Orientador: Prof. Me. Pedro Pio Rosa Nishida

UBERLÂNDIA

2020

ALLAN ROSA PÚBLIO

COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DO TUBO DE IMPEDÂNCIA E O MÉTODO *IN SITU* SEM A UTILIZAÇÃO DE FONTE SONORA PARA A MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Trabalho de Conclusão de Curso **APROVADO** pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Banca Examinadora:

Prof. Me. Pedro Pio Rosa Nishida / (Orientador)

Prof. Dr. Alexandre Zuquete Guarato

Eng. Rafael Ferraresi

UBERLÂNDIA

2020

*“Quer você ache que consegue ou que
não consegue, em ambos os casos você
está certo.”
(Henry Ford)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, pela força e sabedoria durante essa jornada.

Aos meus pais, Clemar Soares Públio Júnior e Vanusa Gonçalves Rosa Públio, por tudo o que me ensinaram durante a minha vida e por tudo o que fizeram por mim e meu irmão, que me proporcionaram a capacidade de ingressar e estudar aonde estou agora. Ao meu irmão Arthur Rosa Públio, pela presença, e à minha família pela confiança e apoio que me deram ao longo de toda a minha vida.

Aos meus sogros John David e Ana Célia, e aos meus cunhados John David Júnior, Francielle, Mary Ellen e Tadeu, pelo apoio e suporte ao longo dessa trajetória. À minha noiva Maria Tereza, por me fazer a cada dia uma pessoa melhor, e por me apoiar e instigar sempre a buscar o meu máximo nos estudos e na vida.

A Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pelo suporte e garantia de ensino de qualidade durante o curso, e aos meus amigos da Faculdade, alunos, professores e profissionais, que dividiram o fardo e avançaram comigo os obstáculos apresentados no caminho.

Agradeço ao Laboratório de Tecnologia e Atrito em Desgaste - LTAD-FEMEC, pelos ensinamentos acadêmicos e técnicos que me proporcionou na primeira fase do meu caminho na universidade.

Agradeço aos colegas Jeancarlo e Fabiana, que muito me auxiliaram na etapa final do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Professor Pedro Pio Rosa Nishida, pela orientação, direcionamento e suporte no decorrer da elaboração deste trabalho.

Agradeço ao Laboratório de Acústica e Vibrações - LAV, pelo suporte dos seus membros e por me fornecer os meios e condições para a realização deste projeto.

PÚBLIO, A. R. **Comparação entre o método do tubo de impedância e o método in situ sem a utilização de fonte sonora para a medição do coeficiente de absorção sonora.** 2020. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel) – Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

RESUMO

É importante se conhecer o coeficiente de absorção sonora para permitir a melhor escolha de materiais acústicos para determinadas aplicações, como revestimento de ambientes, para atenuação de ruído. Existem três métodos experimentais para a medição do coeficiente de absorção sonora: a Câmara Reverberante, o Tubo de Impedância e o Método *In Situ*. Atualmente apenas os métodos da Câmara Reverberante e do Tubo de Impedância possuem normas internacionais de padronização, entretanto o Método *In Situ* envolve custos reduzidos em comparação com os demais e permite analisar as propriedades acústicas dos materiais no seu local de utilização. Este trabalho apresenta uma comparação dos resultados de medições do coeficiente de absorção sonora utilizando o Tubo de Impedância e o Método *In Situ*, a fim de validar a utilização do Método *In Situ*. Os resultados mostraram comportamentos gerais similares nos coeficientes de absorção sonora medidos com o Tubo de Impedância e com o Método *In Situ*. O resultado global indica que o Método *In Situ* é uma alternativa válida para a medição do coeficiente de absorção sonora dos materiais, porém necessita de mais desenvolvimento para a obtenção de resultados satisfatórios nas suas medições.

Palavras-chave: acústica, absorção sonora, tubo de impedância, método in situ, som ambiente, método da função de transferência.

PÚBLIO, A. R. **Comparison between the Impedance Tube Method and the *In Situ* Method without a sound source to the measurement of the sound absorption coefficient.** 2020. 58p. Final Course Assignment (Bachelor) – Mechatronics Engineer Graduation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

ABSTRACT

It is important to know the sound absorption coefficient to allow the best choice of materials to given applications, as room coverings, for noise attenuation. There are three experimental methods for the measurement of the sound absorption coefficient: the Reverberant Chamber, the Impedance Tube and the *In Situ* Method. Currently only the Reverberant Chamber and the Impedance Tube have international rules of standartization, however the *In Situ* Method involves reduced costs in comparison to the others and permit the analysis of the acoustic properties of the materials at the place of use. This work presents a comparison of the results of measurements of the sound absorption coefficient using the Impedance Tube and the *In Situ* Method, in order to validate the use of the presented *In Situ* Method. The results show similar general behaviors in the sound absorption coefficients measured with the Impedance Tube and the *In Situ* Method. The global result indicates that the *In Situ* Method is an valid alternative to the sound absorption coefficient measurement, however it needs further development so it can generate satisfying results in its measures.

Keywords: acoustics, sound absorption, impedance tube, in situ method, environmental noise, transfer function method.

LISTA DE ABREVIATURAS

LAV – Laboratório de Acústica e Vibrações

NPS – Nível de Pressão Sonora

NRC – Coeficiente de Redução Sonora

FT – Função de Transferência

EAN – Ruído Ambiente Anônimo – Environmental Anonymous Noise

LISTA DE SÍMBOLOS

α - coeficiente de absorção sonora
 r - coeficiente de reflexão sonora
 t - coeficiente de transmissão sonora
 f - frequência [Hz]
 f_c - frequência de corte [Hz]
T - tempo de Reverberação de Sabine [s]
V - Volume [m³]
A - Área total de absorção [m²]
 I_i - Intensidade sonora incidente
 I_a - Intensidade sonora absorvida
 I_r - Intensidade sonora refletida
 I_t - Intensidade sonora transmitida

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Propagação do som em um ambiente fechado	4
Figura 2 – Esquema de montagem do Tubo de Impedância	6
Figura 3 – Esquema de montagem do Método In Situ	8
Figura 4 – Crescimento e decaimento sonoro em ambientes fechados	10
Figura 5 – Gerador de sinais DS360	12
Figura 6 – Placa de Aquisição National Instruments USB-9162	12
Figura 7 – Microfone PCB 377B02 com Pré-amplificador	13
Figura 8 – Desenho do Tubo de Impedância utilizado nos experimentos	14
Figura 9 – Tubo de Impedância utilizado nos experimentos	14
Figura 10 – Posicionamento dos microfones no Tubo de Impedância	15
Figura 11 – Montagem do ensaio In Situ	16
Figura 12 – Destaque da Montagem do ensaio In Situ	17
Figura 13 – Coeficientes de absorção sonora obtidos no Tubo de Impedância para amostras de lã de rocha e lã de vidro com espessura de 20 mm	18
Figura 14 – Coeficientes de absorção sonora obtidos no Tubo de Impedância para amostras de lã de rocha e lã de vidro com espessura de 40 mm	19
Figura 15 – Coeficientes de absorção sonora obtidos com o Método In Situ para amostras de lã de rocha e lã de vidro com espessura de 20 mm	20
Figura 16 – Coeficientes de absorção sonora obtidos com o Tubo de Impedância e com o Método In Situ para amostras de lã de rocha de 40 mm de espessura	21
Figura 17 - Coeficientes de absorção sonora obtidos com o Tubo de Impedância e com o Método <i>In Situ</i> para amostras de lã de rocha de 40 mm de espessura	22
Figura 18 - Coeficientes de absorção sonora obtidos com o Tubo de Impedância e com o Método <i>In Situ</i> para amostras de lã de vidro de 40 mm de espessura	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais utilizados nos experimentos de medição de α	11
Tabela 2 – Frequência de Corte e Faixa de Frequência recomendada para o Tubo de Impedância utilizado	15
Tabela 3 – Distâncias de Montagem do experimento <i>In Situ</i>	17
Tabela 4 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] e NRC nos ensaios no Tubo de Impedância para amostras de 20 mm de espessura	18
Tabela 5 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] e NRC nos ensaios no Tubo de Impedância para amostras de 40 mm de espessura	19
Tabela 6 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] e NRC nos ensaios <i>In Situ</i> para amostras de 20 mm	20
Tabela 7 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] e NRC nos ensaios <i>In Situ</i> para amostras de 40 mm	20
Tabela 8 – Valores obtidos de NRC nos ensaios com o Tubo de Impedância e com o Método <i>In Situ</i>	21
Tabela 9 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] nos ensaios no Tubo de Impedância para amostras de 40 mm de espessura e nos ensaios <i>In Situ</i> utilizando lâ de rocha	22
Tabela 10 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] nos ensaios no Tubo de Impe- dância para amostras de 40 mm de espessura e nos ensaios <i>In Situ</i> utilizando lâ de vidro	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Justificativa	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1. Acústica.....	3
2.2. Isolamento de Ruído	4
2.3. Coeficiente de Absorção Sonora α	5
2.4. Métodos de Determinação de α	5
2.5. Tubo de Ondas Estacionárias	6
2.6. Método <i>In Situ</i>	7
2.7. Técnica da Função de Transferência	8
2.8. Tempo de Reverberação	9
3. MATERIAIS E METODOLOGIA	11
3.1. Materiais	11
3.2. Metodologia	13
3.2.1. Técnica da Função de Transferência	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
4.1. Tubo de Ondas Estacionárias	18
4.2. Método <i>In Situ</i>	19
4.3. Análises	21
5. CONCLUSÕES	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é validar o método *in situ* de medição do coeficiente de absorção sonora (α) de materiais diversos sem o uso de uma fonte sonora através da comparação dos resultados das medições *in situ* com os resultados de medições feitas em um tubo de ondas estacionárias (tubo de impedância).

São objetivos específicos da pesquisa:

- Revisão bibliográfica sobre os métodos *in situ* de medição do coeficiente de absorção sonora e do tubo de impedância;
- Estudo da instrumentação acústica utilizada em medições do coeficiente de absorção sonora;
- Medição do coeficiente de absorção sonora de amostras de lã de rocha e lã de vidro utilizando o tubo de impedância e o método *in situ*;
- Comparação dos resultados obtidos utilizando-se o tubo de impedância e o método *in situ*;
- Análise da validade do método *in situ* estudado

1.2. Justificativa

O controle acústico em ambientes arquitetônicos e industriais é realizado a fim de se ter condições acústicas ideais para o tipo de utilização dos mesmos. Nos ambientes arquitetônicos busca-se em primeiro lugar garantir condições acústicas ideais para os diferentes usos do ambiente, como peças de teatro ou concertos musicais, nos quais são necessários determinados graus de inteligibilidade e diferentes tempos de reverberação. Já em ambientes fabris a principal preocupação é com o conforto acústico dos operadores, visto que níveis elevados de ruído sonoro, tanto picos de alto ruído como o efeito cumulativo do ruído após a jornada de trabalho, influenciam diretamente na saúde dos trabalhadores, tanto física como psicológica (GERGES, 2000). Frequentemente são utilizados materiais

absorventes para realizar o controle dos níveis de ruído nesses ambientes, e a caracterização acústica desses materiais é essencial.

Os métodos atuais de medição do coeficiente de absorção sonora (α) possuem limitações próprias que devem ser observadas de acordo com a aplicação. A câmara reverberante possui um custo elevado de instalação e manutenção, o que muitas vezes inviabiliza a medição de α , enquanto o tubo de impedância se restringe à medição do valor de α para uma incidência sonora normal à superfície de interesse. Além disso, ambos os métodos são essencialmente aplicados em um ambiente laboratorial, o que pode mascarar o comportamento acústico do material posicionado no seu local de uso, fazendo com que os resultados obtidos sejam utilizados apenas como referência, não representando em algumas ocasiões as características reais do material durante o seu uso.

As técnicas de medição *in situ* até o presente momento apresentam divergências quanto a medição de α para baixas frequências, bem como influências dos tipos de excitação sonora utilizadas nos ensaios e das condições externas do ambiente durante os experimentos. Assim, este trabalho se justifica no interesse de aperfeiçoar o método *in situ*, a fim de reduzir os fatores negativos do método, visto que ele permite a análise das características acústicas dos materiais nas suas condições reais de utilização, proporcionando um método confiável e com um custo reduzido em comparação com os demais utilizados na atualidade.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Acústica

Todos os corpos em movimento causam o fenômeno chamado de som. O som é a variação da pressão do meio (por exemplo o ar) causada pela movimentação de elementos em seu interior. Entretanto apenas os sons em uma determinada faixa de frequência e amplitude são percebidos pela audição humana. Baixas amplitudes de som não são percebidas pelo ouvido humano, enquanto que altas amplitudes são passíveis de gerar no corpo humano a sensação de desconforto e dor e não de sons como reconhecidos pelo nosso cérebro. Ainda, sons de baixas ou altas frequências, ou seja, fora de uma determinada faixa, também não são percebidos pelo sistema auditivo, ainda que outros sentidos humanos possam reconhecer a sua presença, como as ondas de choque de uma explosão ou a pressão sentida na passagem de aeronaves supersônicas. Chama-se de ruído todo o som que causa algum tipo de desconforto, o que inclui não apenas altas frequências e/ou amplitudes mas também sons repetitivos ou com fatores psicológicos, sendo que a definição de ruído é individual, sendo influenciada pela percepção e imagem que o indivíduo possui em relação aos diversos sons presentes no seu dia a dia (GERGES, 2000). O conforto acústico está cada vez mais presente entre as qualidades esperadas e requeridas em salas em geral, sejam ambientes de trabalho, teatros e estúdios de música ou em residências e habitações. Além disso, a redução dos ruídos e vibração presentes em máquinas faz com que o estudo de soluções acústicas seja cada vez mais motivado, a fim de reduzir ao máximo incômodos decorrentes de sons indesejáveis.

O estudo de acústica se concentra principalmente nas características e parâmetros físicos do som, tais como a pressão sonora, velocidade do som, potência e intensidade sonora, entre outros (KINSLER et al., 1999). Além disso estudam-se os efeitos de interação do som com os elementos presentes no meio, que são a reflexão, a transmissão e a absorção sonora, bem como as mudanças causadas nas ondas sonoras decorrentes dessas interações, e a simulação e análise do comportamento acústico de ambientes fechados. Todas essas áreas de estudo são desenvolvidas tanto de forma teórica e de simulação computacional como de forma empírica e experimental, visando o entendimento e o controle das propriedades acústicas dos diversos ambientes de acordo com as suas necessidades.

2.2. Isolamento de Ruído

O isolamento de ruído tem como objetivo atenuar a influência de fontes de ruído externas em ambientes quem necessitam de um certo controle do NPS (Nível de Pressão Sonora), de modo a proporcionar conforto acústico aos usuários do ambiente, bem como isolar fontes de ruído presentes nos ambientes. O som se propaga tanto pelo ar como por meio das estruturas, como visto na Figura 1, e os projetos de isolamento devem levar em consideração ambos os mecanismos de transmissão de som entre ambientes diferentes (GERGES, 2000). O isolamento acústico geralmente é feito na fonte sonora ou no elemento final, ou seja, o usuário.

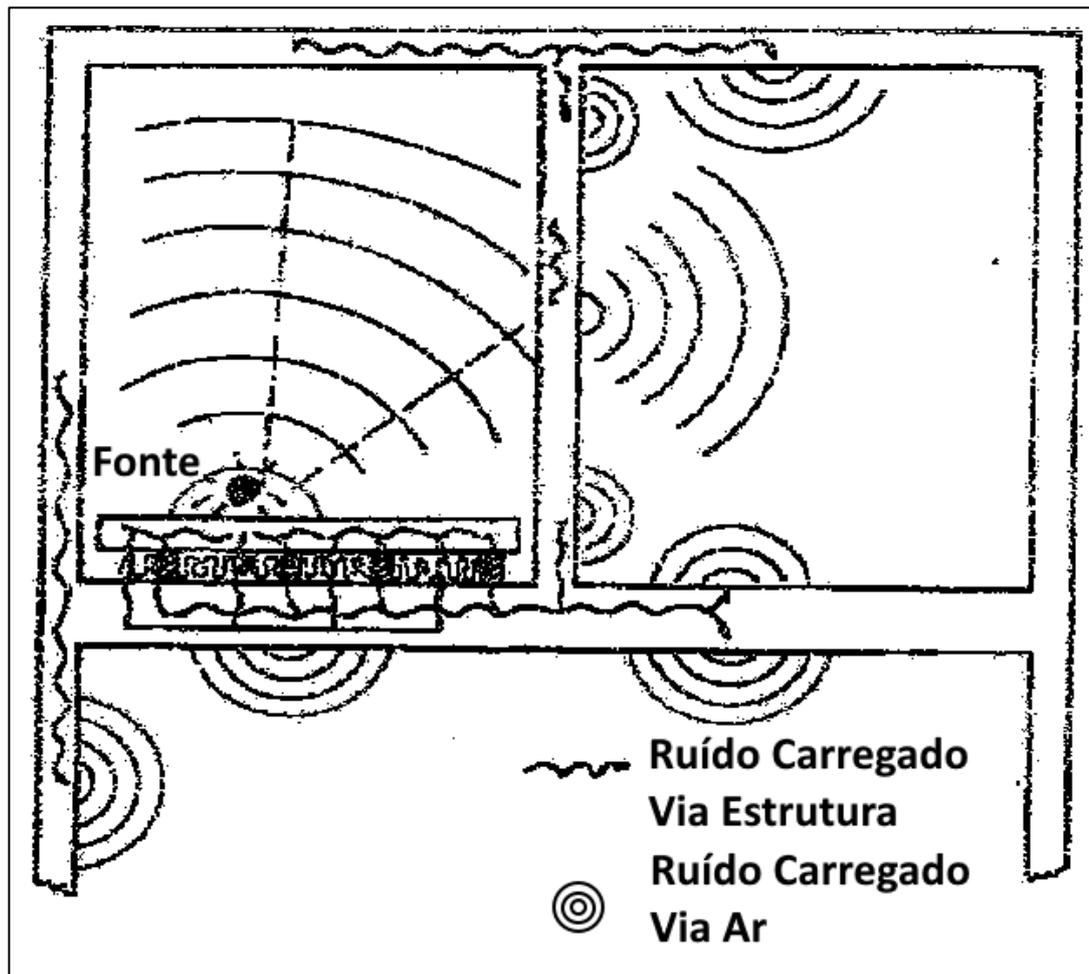


Figura 1 – Propagação do som em um ambiente fechado. Fonte: (GERGES, 2000, p. 188)

O isolamento no usuário consiste no uso de equipamentos de proteção como protetores de inserção ou protetores de concha. Já o isolamento na fonte se dá através do enclausuramento do equipamento causador do ruído acentuado. Também é executado o isolamento na transmissão, que consiste na atenuação do ruído no caminho entre a fonte e o usuário, e este é feito tanto para a transmissão pelo ar como pelas estruturas com o uso de materiais absorventes (BISTAFA, 2018).

2.3. Coeficiente de Absorção Sonora α

Um dos principais métodos de controle da acústica de salas é o uso de materiais acústicos, que se aproveitam principalmente da absorção sonora para fazer o controle de ruído em ambientes. Materiais com um elevado grau de absorção sonora são largamente utilizados em estúdios de gravação e teatros, por exemplo, visto que ao absorver grande parte da potência sonora incidente o som se torna mais inteligível, devido à redução de interferências causadas pelas ondas sonoras que são refletidas de volta ao ambiente (BISTAFA, 2018). A intensidade sonora observada em um ambiente em decorrência da presença de uma fonte sonora é a soma das ondas sonoras que são absorvidas, refletidas e transmitidas quando as ondas sonoras provenientes da fonte interagem com as superfícies dos materiais presentes no ambiente, como descrito na equação 2.1, e a relação entre a transmissibilidade, a reflexividade e a absorção sonora de um determinado material pode ser observada na equação 2.2.

$$I_i = I_a + I_r + I_t \quad (2.1)$$

$$1 = \alpha + r + t \quad (2.2)$$

onde α é o coeficiente de Absorção sonora, r é o coeficiente de reflexão sonora e t é o coeficiente de transmissão sonora das superfícies em interação com as ondas sonoras.

De maneira diferente, podemos interpretar o coeficiente de absorção sonora como na equação 2.3, que descreve o valor de α pela relação com a intensidade sonora incidente na superfície. Nela o valor da intensidade sonora transmitida pelos materiais é desprezada, visto que para a maioria dos materiais utilizados como absorvedores a intensidade sonora das ondas transmitidas é desprezível em comparação com a intensidade das ondas refletidas e absorvidas (BISTAFA, 2018).

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i} = 1 - \frac{I_r}{I_i} \quad (2.3)$$

Uma outra característica que pode ser analisada em conjunto com o coeficiente de absorção sonora é o NRC (Coeficiente de Redução Sonora), que é definido como a média aritmética dos valores de $\alpha(f)$ para as bandas de oitava de 250 Hz a 2000 Hz, como mostrado na equação 2.4 (MAFRA; SOEIRO; ALVES, 2005).

$$NRC = \frac{1}{4} * (\alpha(250) + \alpha(500) + \alpha(1000) + \alpha(2000)) \quad (2.4)$$

2.4. Métodos de Determinação de α

A determinação do valor de α para um determinado material depende de vários fatores diferentes. Além das características físicas do próprio material, as condições de fixação e o ângulo de incidência das ondas sonoras nos materiais acústicos possuem grande influência nos valores da absorção sonora, tanto na porcentagem de energia sonora

absorvida como nas frequências onde ocorre uma maior ou menor absorção dessa energia presente nas ondas sonoras incidentes (KINSLER et al., 1999).

Existem dois métodos principais, largamente utilizados, para a determinação do valor de α para materiais acústicos, que são o Tubo de Ondas Estacionárias e a Câmara Reverberante, cada um com normas internacionais de uso de modo a padronizar a sua utilização (OLIVEIRA; TEODORO, 2016). Outro método bastante estudado é o Método *In Situ*, que busca ser uma alternativa aos métodos anteriores, suprimindo soluções onde os outros métodos são inconsistentes ou de difícil aplicação.

2.5. Tubo de Ondas Estacionárias

O Tubo de Ondas Estacionárias, também conhecido como Tubo de Impedância, é um método de determinação do coeficiente de absorção sonora (α) que também permite a obtenção da impedância acústica dos materiais analisados (CHU, 1986). Ele consiste em um tubo com um alto-falante em uma das extremidades e a amostra de interesse na outra extremidade. A medição pode ser realizada com um ou mais microfones, e o valor de α é obtido através do processamento dos dados medidos pelos microfones utilizando a técnica da função de transferência (CHUNG; BLASER, 1980). A Figura 2 mostra um esquema de montagem de um Tubo de Impedância utilizado para a medição do coeficiente de absorção sonora utilizando dois microfones.

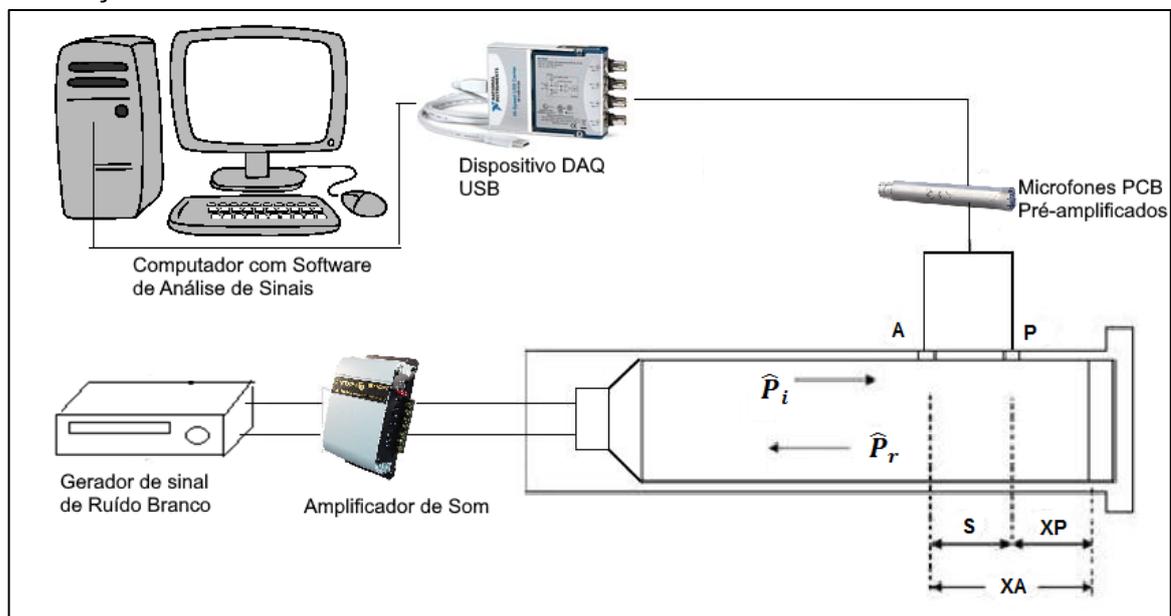


Figura 2 – Esquema de montagem do Tubo de Impedância

Os resultados do Tubo de Impedância são válidos apenas na condição de ondas planas dentro do tubo, o que é uma característica construtiva do tubo (GERGES, 2000). A frequência de corte f_c , que é a máxima frequência observável no tubo para essas condições, é função do diâmetro do tubo d e é descrita pela equação 2.5. Porém Gerges (2000) apresenta uma faixa de frequência onde os resultados podem ser considerados com uma exatidão considerável. A frequência mínima f_{\min} e a frequência máxima f_{\max} são descritas nas equações 2.6 e 2.7, respectivamente.

$$f_c = \frac{1,84c}{\pi d} \quad (2.5)$$

$$f_{min} = \frac{0,1c}{2s} \quad (2.6)$$

$$f_{max} = \frac{0,8c}{2s} \quad (2.7)$$

onde c é a velocidade do som, d é o diâmetro do tubo de Impedância, e s é a distância entre os microfones montados no tubo.

2.6. Método *In Situ*

O principal conceito utilizado para o funcionamento do Método *In Situ* é o do Ruído Ambiente Anônimo (Environmental Anonymous Noise - EA-Noise). O Ruído Ambiente Anônimo é caracterizado em suma como sendo o conjunto dos sons de fundo do campo sonoro do ambiente, sem a presença de nenhuma fonte sonora principal. Sua característica principal é que o conjunto dos sons presentes no campo sonoro não excitam nenhum modo de vibração distinto do ambiente. Takahashi (2005) também confirmou que a presença de uma fonte sonora no campo sonoro prejudica os resultados das medições, mas que a presença de várias fontes sonoras não-correlacionadas distribuídas ao redor do material a ser estudado não interfere nos resultados. Assim Takahashi descreve o Ruído Ambiente Anônimo como sendo similar ao campo sonoro criado por várias fontes sonoras não-correlacionadas distribuídas ao longo do ambiente.

A obtenção da impedância acústica e do coeficiente de absorção sonora utilizando-se este método é baseada na técnica da Função de Transferência, realizando medições no material no local onde ele está instalado, sem a necessidade de produção de amostras para estudo em laboratório (CHU, 1986). A montagem esquemática do método *in situ* pode ser observada na Figura 3.

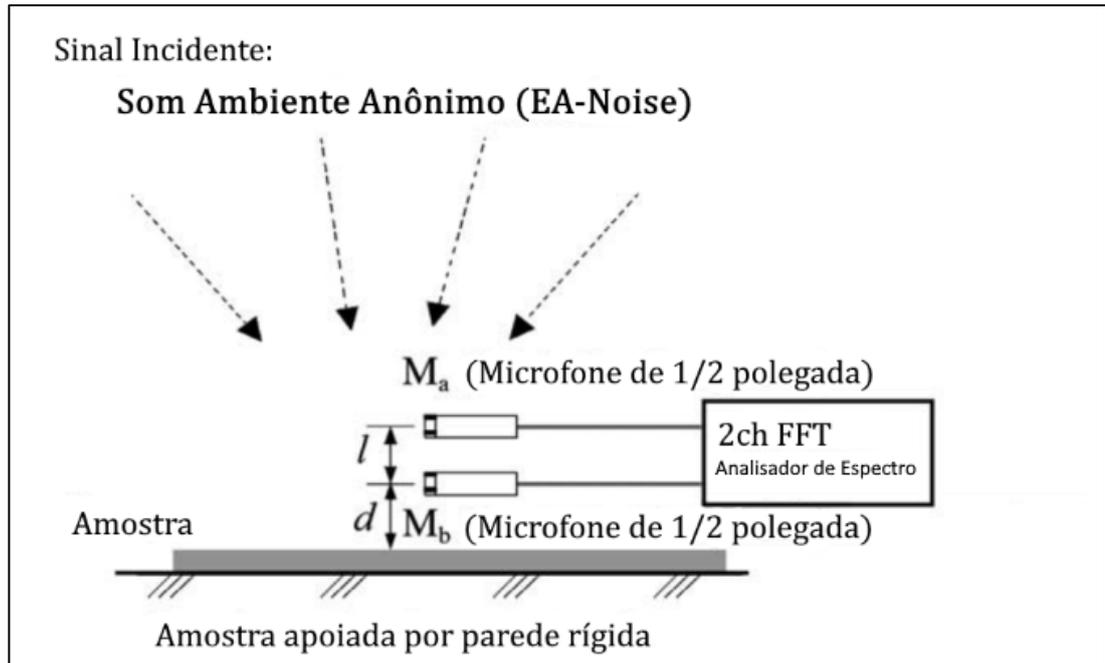


Figura 3 – Esquema de montagem do Método *In Situ* (TAKAHASHI; OTSURU; TOMIKU, 2005)

2.7. Técnica da Função de Transferência

A técnica da Função de Transferência foi inicialmente proposta por Seybert e Ross (SEYBERT; ROSS, 1977 apud CHU, 1986) e desenvolvida por Chung e Blaser (CHUNG; BLASER, 1980 apud CHU, 1986) e Chu (1986) como uma ferramenta para a medição da impedância acústica e do coeficiente α através da relação entre os sinais de diferentes microfones. Com a sua utilização é possível obter o coeficiente complexo de Reflexão sonora, o que posteriormente permite a obtenção da impedância e do coeficiente de Absorção Sonora α .

O coeficiente complexo de Reflexão é descrito pela equação 2.8, que relaciona a função de transferência $H_{12}(f)$ entre os sinais dos microfones 1 e 2, a distância s entre os microfones, o número de onda k , a distância L entre a amostra e o microfone mais próximo da mesma e a constante de atenuação a (CHUNG; BLASER, 1980).

$$R(f) = \frac{H_{12}(f) - e^{-s*(ik+a)}}{e^{s*(ik+a)} - H_{12}(f)} * e^{2L(ik+a)} \quad (2.8)$$

Considerando-se o coeficiente de atenuação como $a = 0$ temos o resultado do coeficiente $R(f)$ segundo Chung e Blaser (1980), como mostrado na equação 2.9.

$$R(f) = \frac{H_{12}(f) - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}(f)} * e^{ik2L} \quad (2.9)$$

Algumas restrições são impostas para os valores de s e L (MAFRA; SOEIRO; ALVES, 2005). Diferentes distâncias L entre os microfones e a amostra devem ser testadas a fim de

evitar que eles estejam posicionados em um ponto nodal do campo sonoro, o que impede uma alta coerência dos sinais dos microfones e compromete os resultados obtidos. Também, a fim de garantir uma alta coerência dos sinais a distância s entre os microfones deve ser pequena. Porém, valores muito pequenos de s comprometem a precisão das medições para baixas frequências (CHU, 1986). Ainda sobre o valor de s , Chung e Blaser (1980) mostraram que o valor de s deve ser escolhido em função da frequência máxima observada desejada f_m , como mostrado na equação 2.10.

$$s < \frac{c}{2f_m} \quad (2.10)$$

onde c é a velocidade do som no meio. A partir do coeficiente de reflexão $R(f)$ é possível descrever o coeficiente de absorção sonora normal α como na equação 2.11.

$$\alpha(f) = 1 - |R(f)|^2 \quad (2.11)$$

2.8. Tempo de Reverberação

O campo sonoro de um ambiente fechado é caracterizado como sendo a soma dos sons provenientes diretamente de uma (ou mais) fonte(s) sonora(s) presente(s) no ambiente e da reflexão das ondas sonoras desses campos quando as mesmas colidem com as superfícies do ambiente e dos objetos nele presentes. A este campo sonoro caracterizado pelas reflexões das ondas sonoras da(s) fonte(s) sonora(s) dá-se o nome de campo reverberante, e uma das características principais deste campo é o Tempo de Reverberação. Sabine encontrou uma relação empírica do tempo de reverberação de uma sala com o seu volume e a quantidade de área de materiais absorventes presentes na sala, que pode ser observada na equação 2.12 (KINSLER et al., 1999).

$$T \propto \frac{V}{A} \quad (2.12)$$

onde T é o Tempo de reverberação, V é o volume do ambiente e A é a soma das áreas de materiais absorventes.

Fisicamente entende-se que o tempo de reverberação pode ser descrito como sendo o tempo necessário para que, uma vez desligada uma fonte sonora que está gerando um campo difuso em uma sala, a intensidade sonora do ambiente seja reduzida em 60 dB (GERGES, 2000, p. 264), em decorrência da dissipação da energia sonora das ondas provenientes de reflexões do campo sonoro da fonte enquanto a mesma estava ligada. Partindo da equação 2.12, Sabine definiu o tempo de reverberação T como visto na igualdade da equação 2.13. Entretanto, a equação 2.13 foi desenvolvida para ambientes com campo sonoro difuso, não podendo ser utilizada para casos com ambientes com alto coeficiente de absorção.

$$T = \frac{0,161V}{A} \quad (2.13)$$

onde V é o volume total do ambiente e A é o somatório da área que limita o ambiente.

A Figura 4 mostra a variação do nível de pressão sonora em um ambiente fechado quando se possui uma fonte sonora ligada e a mesma é desligada após um certo período de tempo.

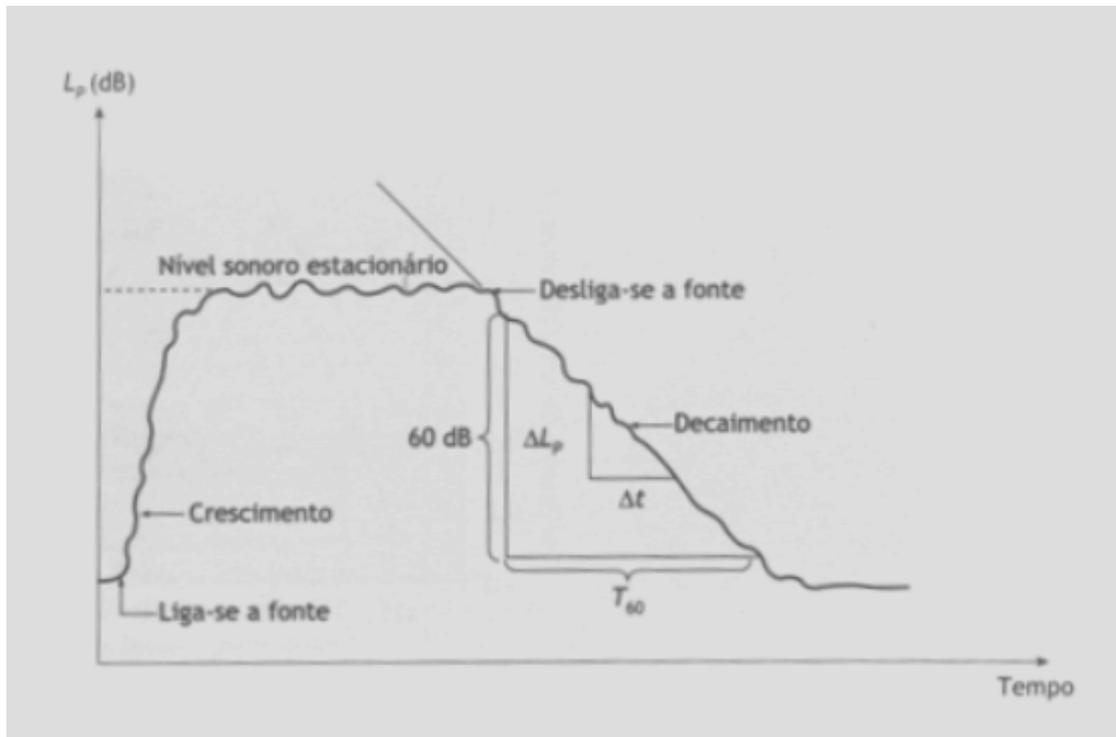


Figura 4 – Crescimento e decaimento sonoro em ambientes fechados (TEODORO, 2016)

Devido à restrição de uso da equação 2.13, uma outra aproximação do valor do Tempo de Reverberação foi proposta por Eyring (GERGES, 2000, p. 266), a fim de permitir o uso da equação de Sabine para ambientes com tempos de reverberação baixos, isto é, com um alto valor de absorção sonora. A aproximação de Eyring pode ser vista na equação 2.14.

$$T = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.14)$$

onde S é a área total do ambiente em m^2 , V é o volume total do ambiente em m^3 e α é o coeficiente de absorção sonora médio das superfícies do ambiente.

CAPÍTULO III

Materiais e Metodologia

Neste capítulo são descritos os materiais necessários e os métodos empregados para a medição dos coeficientes de absorção sonora propostos neste trabalho.

3.1. Materiais

Os materiais a serem analisados são placas de lã de rocha e lã de vidro, cujas características físicas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais utilizados nos experimentos de medição de α

	Lã de Rocha	Lã de Vidro
Densidade [kg/m^3]	32	16
Espessura [mm]	20 e 40	20 e 40

A forma e as dimensões das amostras são diferentes para os dois tipos de ensaios realizados, sendo descritos especificamente para cada método de ensaio.

Os equipamentos necessários para a montagem dos experimentos são um tubo de impedância, um gerador de sinais, uma placa de aquisição de sinais digital, um computador com *softwares* de análise e processamento de sinais, um amplificador de som, um auto-falante e dois microfones PCB pré-amplificados. Os modelos dos principais equipamentos utilizados são descritos a seguir.

- Gerador de Sinais: DS360 Low Distortion Function Generator (Figura 5)



Figura 5 – Gerador de sinais DS360 (Fonte: tirada pelo autor)

- Placa de Aquisição: NI USB-9162 (Figura 6)



Figura 6 – Placa de Aquisição National Instruments USB-9162 (Fonte: tirada pelo autor)

- Microfones: PCB 377B02 com Pré-amplificador (Figura 7)



Figura 7 – Microfone PCB 377B02 com Pré-amplificador (Fonte: tirada pelo autor)

3.2. Metodologia

Os métodos utilizados neste trabalho para a medição do coeficiente de absorção sonora são o Tubo de Ondas Estacionárias e o Método *in situ* e a técnica de processamento dos dados é a Técnica da Função de Transferência.

3.2.1. Tubo de Ondas Estacionárias

Para os ensaios usando o tubo de impedância foram fabricadas amostras cilíndricas nos materiais utilizados com um diâmetro de 53 mm e espessura de 20 mm. Para cada material foram produzidos dois cilindros como os descritos, a fim de realizar os ensaios com amostras de 20 mm (um cilindro do material estudado sobre um cilindro metálico) e amostras de 40 mm (dois cilindros do material estudado superpostos).

A Figura 8 mostra um desenho do tubo de impedância utilizado no experimento, e a Figura 9 mostra uma foto do mesmo. A distância entre a amostra e o microfone na posição 1 (mais próximo da amostra) é de 3 mm (característica da construção física do Tubo de Impedância utilizado) e a distância entre os microfones é de 68 mm, que é a distância entre as posições 1 e 5 do Tubo de Impedância, escolhidas utilizando-se as equações 2.5, 2.6 e 2.7.

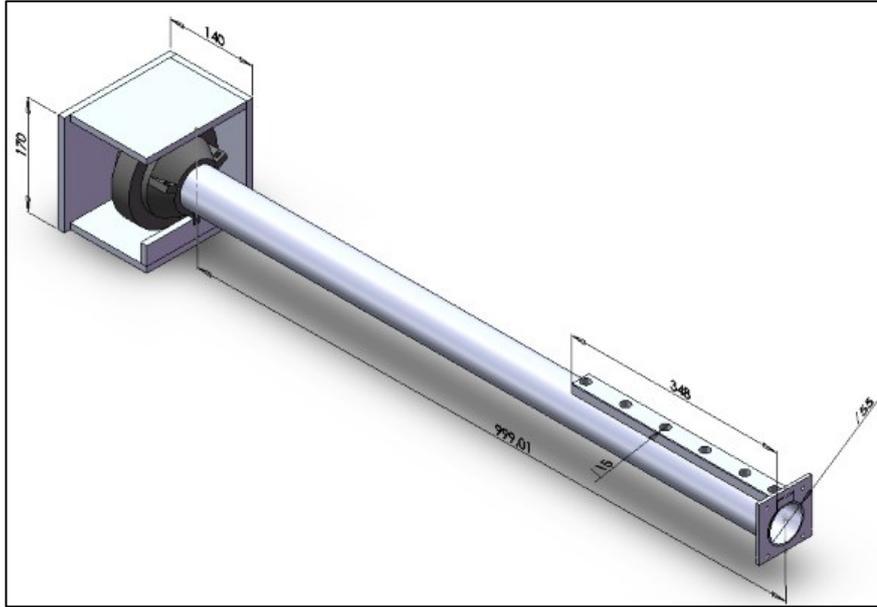


Figura 8 – Desenho do Tubo de Impedância utilizado nos experimentos (Fonte: MAFRA; SOEIRO; ALVES, 2005)



Figura 9 – Tubo de Impedância utilizado nos experimentos (Fonte: tirada pelo autor)

Para realizar a medição do coeficiente de absorção sonora da amostra posicionada na extremidade do tubo de impedância liga-se o gerador de sinais configurado para gerar um ruído branco, que é amplificado pelo amplificador e reproduzido no auto-falante. Em seguida inicia-se o processo de aquisição utilizando os dois microfones, previamente posicionados em duas posições conhecidas do tubo de impedância. A Figura 10 mostra o posicionamento utilizado dos microfones na montagem do tubo de impedância. Para o experimento os microfones foram posicionados nas posições 1 e 5, sendo que a posição 1 é a mais próxima da amostra.

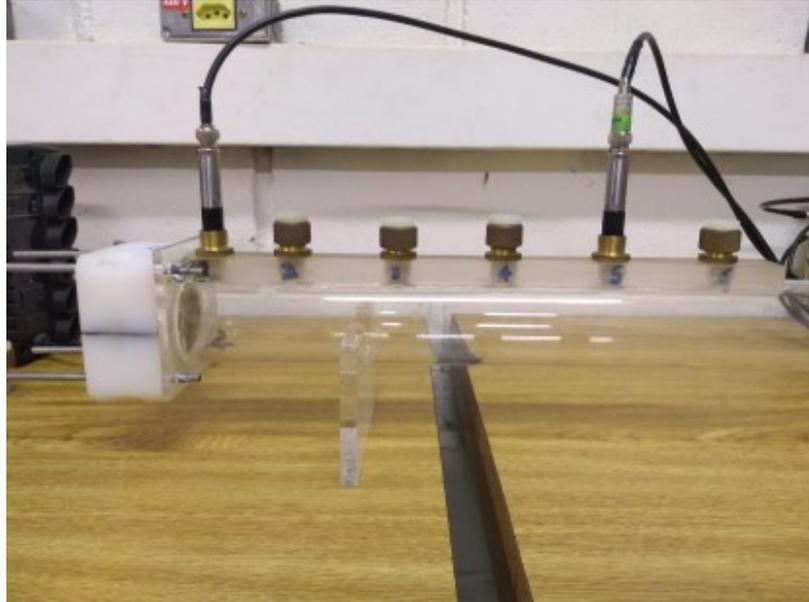


Figura 10 – Posicionamento dos microfones no Tubo de Impedância

Após a obtenção da Função de Transferência entre os sinais dos dois microfones é possível determinar o coeficiente de absorção sonora normal α_n da amostra em questão utilizando a equação 2.11. Estes valores de α são válidos para frequências abaixo de uma determinada frequência de corte e para uma determinada faixa de frequência, que são características da construção do Tubo de Impedância, e podem ser determinadas utilizando-se as equações 2.5, 2.6 e 2.7. Os valores destas frequências para o tubo de impedância utilizado são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Frequência de Corte e Faixa de Frequência recomendada para o Tubo de Impedância utilizado

	f_{min}	f_{max}	f_c
Valor [Hz]	254	2036	3840

3.2.1. Método *In Situ*

Para os ensaios utilizando o método *in situ* utilizam-se amostras de painéis retangulares com determinadas dimensões. Essas dimensões influenciam principalmente na frequência mínima na qual o valor de α pode ser determinado no ensaio com maior exatidão. Uma foto da montagem real é vista na Figura 11.



Figura 11 – Montagem realizada do Método *In Situ*

Como o ensaio *in situ* proposto não se utiliza de uma fonte sonora, é necessário se observar a presença de alguma fonte sonora externa aos limites do ensaio, visto que para a obtenção de resultados confiáveis o nível de pressão sonora ambiente deve ser o mais uniforme possível. Assegurada essa condição (NPS do ambiente sem muitas variações), o procedimento consiste em realizar a aquisição dos sinais dos microfones, posicionados como visto na Figura 3 e na foto da Figura 12, para se obter a Função de Transferência entre os sinais dos microfones e, a partir da FT, determinar o valor de $\alpha(f)$ para a amostra. Os microfones foram posicionados de modo a estarem próximos à amostra, e as distâncias entre os microfones e entre os microfones e a amostra foram medidas e são apresentadas na Tabela 3. Chu (1986) aponta que erros aleatórios significativos podem surgir nos resultados em pontos onde a coerência entre os sinais dos microfones 1 e 2 é baixa, assim a distância s entre os microfones utilizada deve ser um valor pequeno, visto que a proximidade entre os microfones aumenta a coerência entre os sinais adquiridos.



Figura 12 – Destaque da Montagem realizada do Método *In Situ*

Tabela 3 – Distâncias de Montagem do experimento *In Situ*

	Lã de Rocha	Lã de Vidro
Distância entre os Microfones s [mm]	2.70	3.20
Distância até a amostra L [mm]	2.70	3.10

3.2.1. Técnica da Função de Transferência

Após a aquisição dos dados dos experimentos através dos métodos do Tubo de Impedância e *In Situ* é realizado um tratamento e processamento dos dados utilizando a técnica da Função de Transferência para se obter os valores do coeficiente de absorção sonora $\alpha(f)$ das amostras.

O programa desenvolvido para o processamento dos dados foi implementado utilizando-se o *software* MATLAB (2018). As amostras obtidas são divididas em amostras menores utilizando-se uma separação direta dos arquivos das amostragens (foram colhidas amostras de 300 segundos e divididas em um conjunto de amostras de 30 segundos), a fim de permitir o cálculo de um valor médio de $\alpha(f)$, reduzindo assim a presença de ruídos nos resultados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Tubo de Ondas Estacionárias

As Figuras 13 e 14 mostram os resultados dos ensaios no tubo de impedância para as amostras de lã de rocha e lã de vidro, respectivamente. As Tabelas 4 e 5 mostram os valores obtidos de α na frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, bem como o valor calculado do NRC das amostras estudadas utilizando-se a equação 2.4, para as amostras de 20 mm e 40 mm de espessura, respectivamente.

Tabela 4 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] e NRC nos ensaios no Tubo de Impedância para amostras de 20 mm de espessura

Amostra	$\alpha(250\text{Hz})$	$\alpha(500\text{Hz})$	$\alpha(1000\text{Hz})$	$\alpha(2000\text{Hz})$	NRC
Lã de Rocha	0.5101	0.3571	0.4127	0.6796	0.4899
Lã de Vidro	0.4328	0.2817	0.3998	0.6146	0.4322

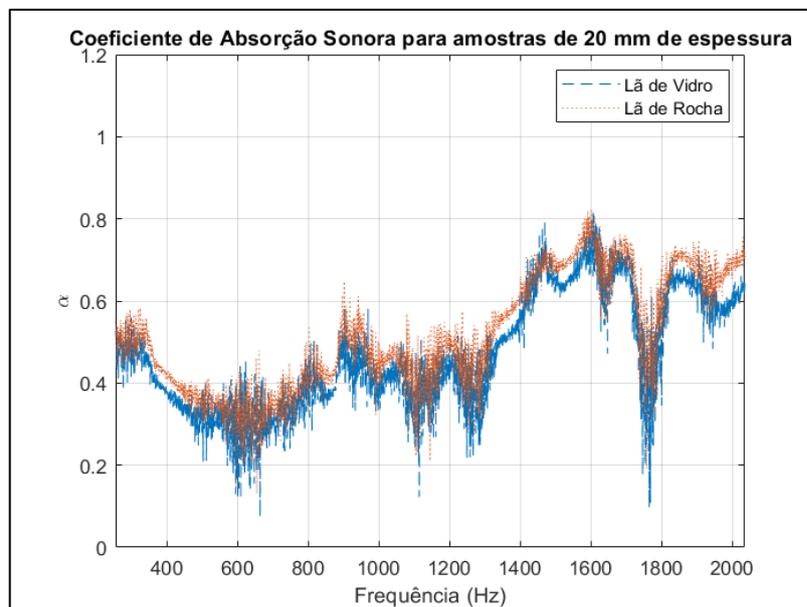


Figura 13 – Coeficientes de absorção sonora obtidos no Tubo de Impedância para amostras de lã de rocha e lã de vidro com espessura de 20 mm (Fonte: tirada pelo autor)

Tabela 5 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] e NRC nos ensaios no Tubo de Impedância para amostras de 40 mm de espessura

Amostra	$\alpha(250\text{Hz})$	$\alpha(500\text{Hz})$	$\alpha(1000\text{Hz})$	$\alpha(2000\text{Hz})$	NRC
Lã de Rocha	0.6398	0.5740	0.7380	0.9882	0.7350
Lã de Vidro	0.5598	0.4967	0.8308	0.9946	0.7205

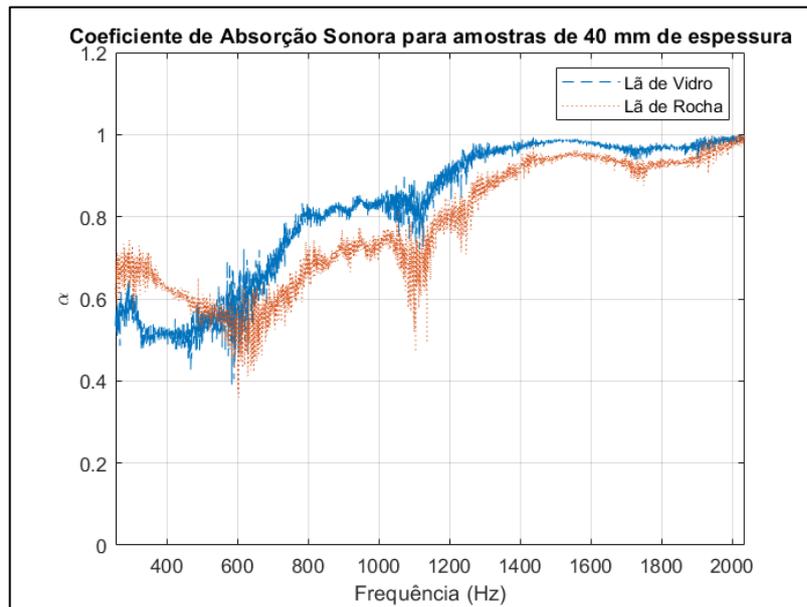


Figura 14 – Coeficientes de absorção sonora obtidos no Tubo de Impedância para amostras de lã de rocha e lã de vidro com espessura de 40 mm (Fonte: tirada pelo autor)

Observa-se que os resultados obtidos com o Tubo de Impedância mostram um comportamento esperado do coeficiente de absorção sonora para os materiais utilizados, onde o valor do coeficiente de absorção cresce junto com o aumento da frequência, se aproximando do valor unitário (absorção total) nas frequências mais altas. Observa-se também que o comportamento geral do coeficiente de absorção sonora é bem similar para os dois materiais estudados, visto que os mecanismos de absorção sonora de ambos os materiais são os mesmos.

4.2. Método *In Situ*

As Figuras 15 e 16 mostram os resultados dos ensaios *in situ* para as amostras de lã de rocha e lã de vidro, respectivamente. As Tabelas 6 e 7 mostram os valores obtidos de α na frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, bem como o valor

calculado do NRC das amostras estudadas utilizando-se a equação 2.4, para as amostras de 20 mm e 40 mm de espessura, respectivamente.

Tabela 6 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] e NRC nos ensaios *In Situ* para amostras de 20 mm

Amostra	$\alpha(250\text{Hz})$	$\alpha(500\text{Hz})$	$\alpha(1000\text{Hz})$	$\alpha(2000\text{Hz})$	NRC
Lã de Rocha	0.4000	0.6485	0.5482	0.6675	0.5660
Lã de Vidro	0.2185	0.4877	0.7190	0.7237	0.5372

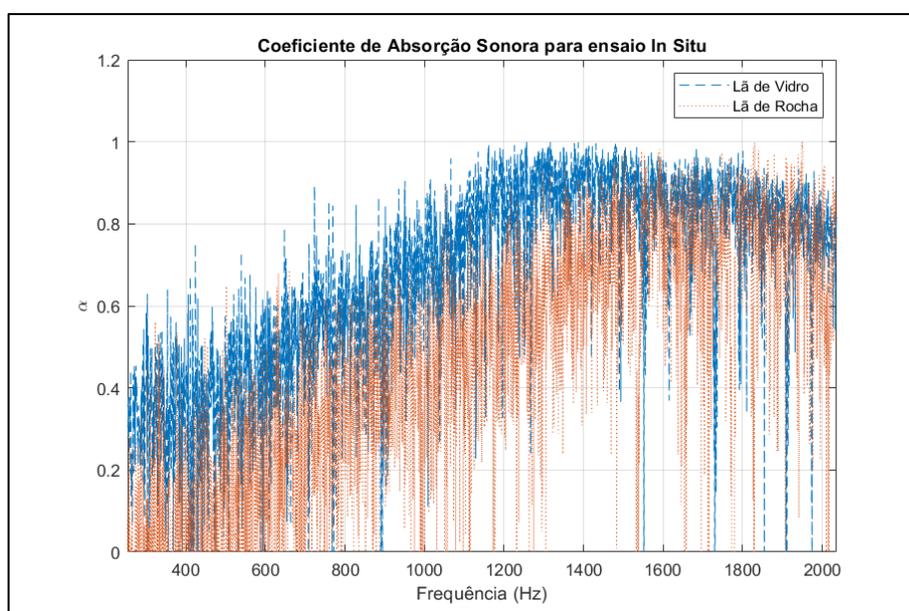


Figura 15 – Coeficientes de absorção sonora obtidos no Tubo de Impedância para amostras de lã de rocha e lã de vidro com espessura de 20 mm (Fonte: tirada pelo autor)

Tabela 7 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] e NRC nos ensaios *In Situ* para amostras de 40 mm

Amostra	$\alpha(250\text{Hz})$	$\alpha(500\text{Hz})$	$\alpha(1000\text{Hz})$	$\alpha(2000\text{Hz})$	NRC
Lã de Rocha	0.4000	0.6485	0.5482	0.6675	0.5660
Lã de Vidro	0.2185	0.4877	0.7190	0.7237	0.5372

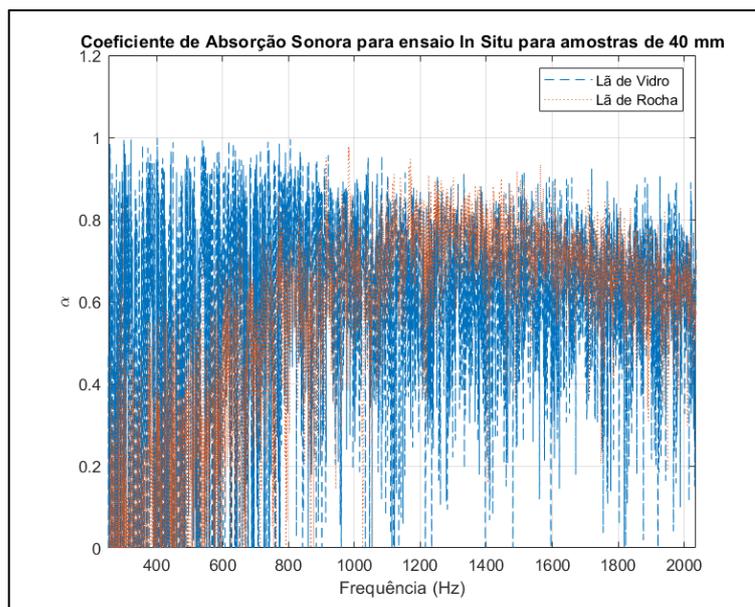


Figura 16 – Coeficientes de absorção sonora obtidos no Tubo de Impedância para amostras de lã de rocha e lã de vidro com espessura de 40 mm (Fonte: tirada pelo autor)

Observa-se que os resultados obtidos nos ensaios *In Situ* mostram um comportamento geral do coeficiente de absorção sonora semelhante dos obtidos com o Tubo de Impedância, onde o valor do coeficiente de absorção aumenta junto com o aumento da frequência, se aproximando da absorção completa

4.3. Análises

A Tabela 8 mostra os resultados do NRC para os ensaios com o Tubo de Impedância e os ensaios usando o Método *In Situ*, enquanto as Tabelas 9 e 10 mostram os valores obtidos de α nas frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

Tabela 8 – Valores obtidos de NRC nos ensaios com o Tubo de Impedância e com o Método *In Situ*

Amostra	NRC p/ Tubo de Impedância	NRC p/ <i>In Situ</i>
Lã de Rocha - 20 mm	0,4899	0,5262
Lã de Rocha - 40 mm	0,7350	0,5660
Lã de Vidro - 20 mm	0,4322	0,5372
Lã de Vidro - 40 mm	0,7205	0,5855

Tabela 9 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] nos ensaios no Tubo de Impedância para amostras de 40 mm de espessura e nos ensaios *In Situ* utilizando lã de rocha

Amostra	α (250Hz)	α (500Hz)	α (1000Hz)	α (2000Hz)
Tubo de Impedância	0.5598	0.4967	0.8308	0.9946
In Situ	0.4000	0.6485	0.5482	0.6675

Tabela 10 – Valores obtidos de α [250, 500, 1000 e 2000 Hz] nos ensaios no Tubo de Impedância para amostras de 40 mm de espessura e nos ensaios *In Situ* utilizando lã de vidro

Amostra	α (250Hz)	α (500Hz)	α (1000Hz)	α (2000Hz)
Tubo de Impedância	0.5598	0.4967	0.8308	0.9946
In Situ	0.2185	0.4877	0.7190	0.7237

As Figuras 17 e 18 mostram os resultados do coeficiente de absorção sonora obtidos utilizando o Tubo de Impedância e o Método *In Situ* superpostos para as amostras de lã de rocha e lã de vidro com 40 mm de espessura, respectivamente.

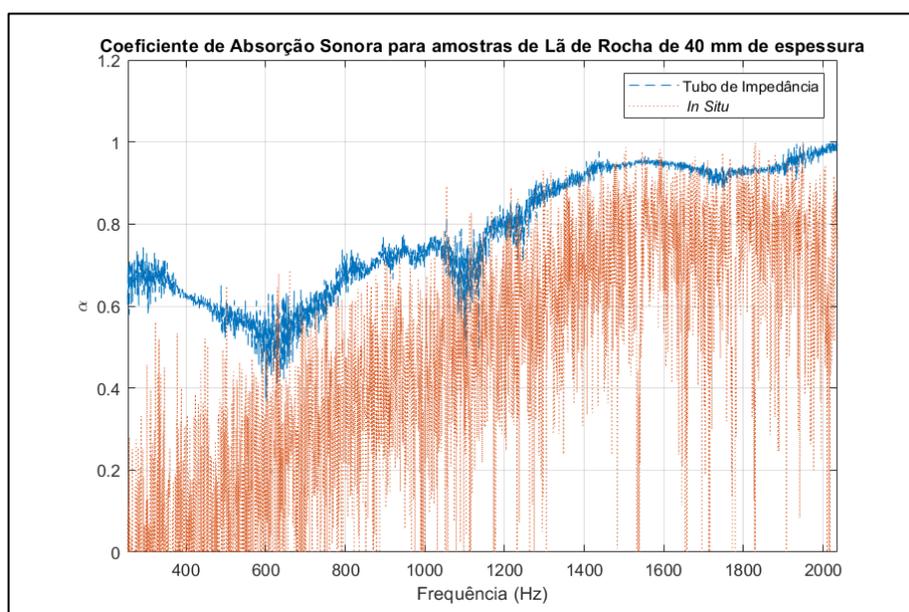


Figura 17 - Coeficientes de absorção sonora obtidos com o Tubo de Impedância e com o Método *In Situ* para amostras de lã de rocha de 40 mm de espessura (Fonte: tirada pelo autor)

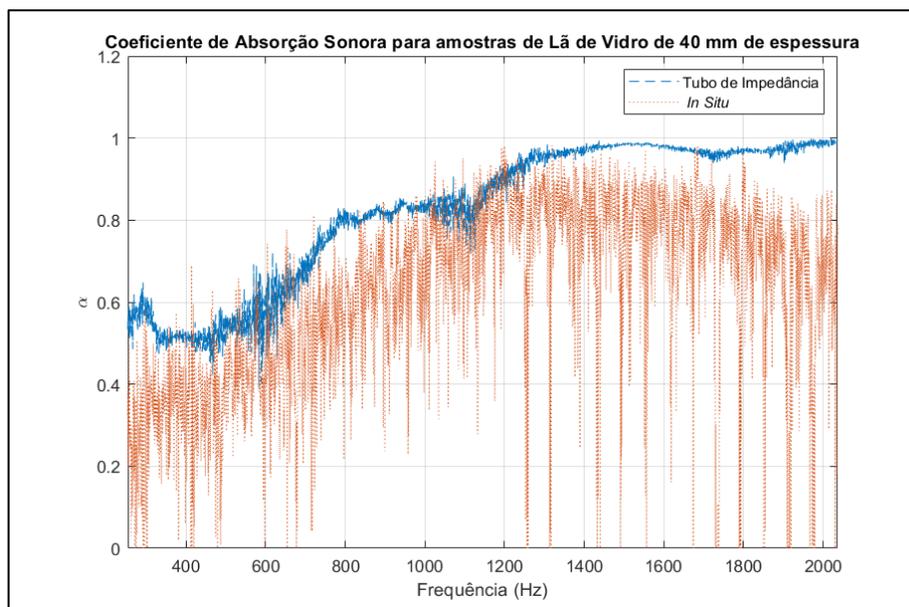


Figura 18 - Coeficientes de absorção sonora obtidos com o Tubo de Impedância e com o Método *In Situ* para amostras de lã de vidro de 40 mm de espessura (Fonte: tirada pelo autor)

Observa-se nas figuras 17 e 18 uma proximidade entre as duas curvas de Coeficiente de Absorção sonora, tanto para as amostras de lã de rocha como para as de lã de vidro. Percebe-se que ambas as curvas possuem uma característica de crescimento do coeficiente com o crescimento da frequência, na faixa de frequência estudada.

Ao analisar-se o comportamento de α para a faixa de baixas frequências percebe-se que os resultados obtidos para as amostras de lã de vidro são mais similares entre si em comparação com o grau de similaridade das curvas obtidas com as amostras de lã de rocha, para a mesma faixa de frequência. Entretanto, as curvas de ambos os tipos de amostras apresentam a mesma característica para a faixa de altas frequências, onde as curvas obtidas com o Tubo de Impedância tendem a se aproximar da unidade (100% de absorção sonora) enquanto as curvas obtidas com o Método *In Situ* apresentaram uma queda nessa mesma faixa de frequência.

Outra característica notada na observação das figuras 17 e 18 é que as curvas obtidas utilizando-se o Método *In Situ* permanecem sempre abaixo das curvas obtidas com o Tubo de Impedância, apesar de ambas as curvas estarem próximas umas das outras.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

As medições do coeficiente de absorção sonora utilizando-se o Tubo de Impedância foram validadas, pois os resultados são similares aos vistos na bibliografia para os materiais estudados

O processo de medição do coeficiente de absorção sonora utilizando-se o Método *In Situ* foi validado através da comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos utilizados neste trabalho.

Fatores que limitaram o desenvolvimento do projeto incluem a quantidade de materiais para a confecção de amostras para medição, que limitam a faixa de frequência observável para os ensaios *In Situ*; as características construtivas do Tubo de Impedância, a resposta em frequência do alto falante e a sensibilidade dos microfones utilizados, que limitam a faixa de frequência observável para os ensaios utilizando-se o Tubo. Outro fator limitante para este projeto foram defeitos pontuais na placa de aquisição pertencente ao LAV, sendo que apenas um canal de entrada estava em perfeito funcionamento, o que exigiu mudanças no método inicial de aquisição dos dados deste trabalho.

O desenvolvimento deste projeto permitiu também a idealização de trabalhos futuros, visando o estudo e possível melhoria do entendimento do fenômeno da absorção sonora e dos processos de medição do coeficiente de absorção sonora de materiais vistos nesse trabalho, e principalmente do Método *In Situ*. Possíveis trabalhos futuros podem explorar a influência da variação da distância entre os microfones e da distância entre a amostra e os microfones nos resultados finais do coeficiente de absorção sonora dos materiais estudados. Também, a influência da área das amostras estudadas tanto na faixa de frequência observável como no grau de similaridade dos coeficientes de absorção obtidos em comparação com outros métodos normatizados, como o Tubo de Impedância.

Ao longo da realização deste trabalho foi possível observar os processos envolvidos na medição do coeficiente de absorção sonora de materiais utilizando-se o Tubo de Impedância e o Método *In Situ* em conjunto com o Método da Função de Transferência, desde a instrumentação e aquisição dos dados dos experimentos até o processamento computacional e subsequente obtenção do coeficiente de absorção sonora a partir dos dados coletados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. [S.l.]: Editora Blucher, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

CHU, W. T. **Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone**. *The Journal of the Acoustical Society of America*, ASA, v. 80, n. 2, p. 555–560, 1986. Citado 5 vezes nas páginas 32, 33, 34, 35 e 42.

CHUNG, J. Y.; BLASER, D. A. **Transfer function method of measuring induct acoustic properties**: I. theory, ii. experiment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 68, p. 907–921, 1980. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 35.

GERGES, S. N. **Ruído: fundamentos e controle**. In: *Ruído: fundamentos e controle*. [S.l.: s.n.], 2000. Citado 6 vezes nas páginas 25, 29, 30, 33, 35 e 36.

KINSLER, L. E. et al. **Fundamentals of acoustics**. *Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999.*, p. 560, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 29, 32 e 35.

MAFRA, M. P. A.; SOEIRO, N. S.; ALVES, E. C. **Determinação e análise comparativa dos coeficientes de absorção de painéis confeccionados a partir da fibra de coco e um painel de uso comercial**. 2005. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.

MATLAB. *version 9.4.0.813654 (R2018a)*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2018. Citado na página 43.

OLIVEIRA, E. C. de; TEODORO, E. B. **Métodos para medição do coeficiente de absorção sonora**. 2005. Citado na página 32.

SEYBERT, A. F.; ROSS, D. F. **Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique**. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 61, p. 1362–1370, 1977. Citado na página 34.

TAKAHASHI, Y.; OTSURU, T.; TOMIKU, R. **In situ measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise**. *Applied Acoustics*, Elsevier, v. 66, n. 7, p. 845–865, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

TEODORO, E. B. Unidade 7: **Acustica de ambientes fechados**. Notas de aula. 2016. Citado na página 36.