



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Thiago Curi Malaguetta

Medição de impedância acústica *in situ* usando arranjo de microfones

Campinas

2018



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Thiago Curi Malaguetta

Medição de impedância acústica *in situ* usando arranjo de microfones

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Sanches Masiero

Co-orientador Prof. Dr. Eric Brandão Carneiro

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Thiago Curi Malaguetta, e orientada pelo Prof. Dr. Bruno Sanches Masiero

Campinas

2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C914m Curi Malaguetta, Thiago, 1992-
Medição de impedância acústica in situ usando arranjo de microfones /
Thiago Curi Malaguetta. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Bruno Sanches Masiero.
Coorientador: Eric Brandão Carneiro.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Impedância acústica. 2. Microfones. 3. Processamento de sinais. I.
Masiero, Bruno Sanches, 1981-. II. Carneiro, Eric Brandão. III. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Acoustic impedance measurement in situ using a microphone array

Palavras-chave em inglês:

Acoustic impedance

Microphone

Signal processing

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Bruno Sanches Masiero [Orientador]

Stellamaris Rolla Bertoli

Tiago Fernandes Tavares

Data de defesa: 19-10-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Thiago Curi Malaguetta RA 190743

Data de defesa: 19 de outubro de 2018

Título da dissertação: “Medição de impedância acústica *in situ* usando arranjo de microfones”

Prof. Dr. Bruno Sanches Masiero (FEEC/Unicamp, Presidente)

Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli (FEC/Unicamp, Membro Externo)

Prof. Dr. Tiago Fernandes Tavares (FEEC/Unicamp, Membro Interno)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Dedico esta tese a todo mundo.

Agradecimentos

A todos que sempre acreditaram, e que me ajudaram a ir mais longe, do que jamais teria conseguido ir sozinho.

Aos professores Bruno Sanches Masiero e Eric Brandão Carneiro, por terem confiado e me orientado durante esse trajeto na pós graduação.

Aos meus familiares, mãe, avó, tias e tios, que sempre deram apoio incondicional para o que eu queria fazer.

Aos meus amigos que estavam comigo nas adversidades.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”
(Albert Einstein)

Resumo

O comportamento acústico dentro de teatros, salas de aula, aviões ou carros, por exemplo, é de suma importância para um melhor adequação sonora desejada, como em concertos de movimentos músicas específicos (e.g. barroco e romantismo) e para o conforto acústico das pessoas dentro desses ambientes. A modelagem desses ambientes é objeto de constante pesquisa e melhoria. Para podermos simular e prever o comportamento acústicos nestes espaços é necessário conhecer sua geometria e a impedância acústica dos materiais que o compõem. Esta dissertação tem como objetivo caracterizar a impedância acústica de materiais utilizando um arranjo de microfones e técnicas de processamento de sinais promotoras de esparsidade. Inicialmente, foi elaborado um modelo computacional para simular a reflexão de uma onda por um material poroso finito, material que é comumente usado como fono absorvedor, e assim, avaliar a viabilidade do uso da técnica proposta. Verifica-se que a técnica promotora de esparsidade estudada *sparse learning via iterative minimization* (SLIM) foi capaz de localizar e segregar o som direto do som refletido, para posterior cálculo da impedância acústica. Em um segundo momento, as técnicas foram avaliadas com medidas reais. Para tanto, foi utilizado um arranjo linear com quatro microfones e três materiais diferentes foram medidos: lã de vidro (material poroso), lã de rocha (material poroso) e madeira (material rígido). As medições indicam que o método é viável para uma banda limitada de frequência (de 1 kHz até 16 kHz). Mostrando que há viabilidade no uso de técnicas esparsas junto de arranjo de microfones na determinação da impedância acústica de superfície de um determinado material poroso.

Palavras-chaves: Impedância acústica; acústica; medição *in situ*; câmara anecoica; arranjo de microfones; algoritmos promotores de esparsidade; processamento de sinais.

Abstract

The acoustic behavior of theatres, classrooms, airplanes, and cars is of great importance and subject of constant research and improvement. In order to simulate and predict the behavior of these spaces it is necessary to know its geometry and the acoustic impedance of its building materials. This dissertation aims to characterize the acoustic impedance of materials using an array of microphones and sparsity promoting signal processing techniques. Initially, a computational model was developed to simulate the wave reflection by a limited porous material and, thus, evaluate the feasibility of using the proposed technique. It could be verified that the *sparse learning via iterative minimization* (SLIM) algorithm was able to separate direct and reflected sound, thus allowing the calculation of the reflection coefficient. In a second moment, the techniques were also evaluated with real measurements. For that, a linear array with four microphones was used and three different materials were tested: glass wool (porous material), rock wool (porous material) and wood (rigid material). Measurements indicate that the method is feasible for a limited frequency band (from 1 kHz up to 16 kHz). Showing that there is feasibility in the use of sparse techniques in microphone arrangement in determining the surface acoustical impedance of a given porous material.

Keywords: Acoustic impedance; acoustics; *in situ* measurement; anechoic chamber; microphone array; sparse algorithm; signal processing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema da interação de onda sonora com região de impedância	21
Figura 2 – Esquema da técnica de separação proposta por Yuzawa (1975)	25
Figura 3 – Esquema de medição usado por Mommertz (1995). (1) Som refletido pela amostra. (2) Onda incidente. (3) Reflexão espúria.	26
Figura 4 – Método de subtração realizado por Mommertz (1995) com o esquema da Figura 3.	27
Figura 5 – Câmara reverberante da Faculdade de engenharia mecânica da UNICAMP	28
Figura 6 – Câmara anecoica da Faculdade de engenharia mecânica da UNICAMP	29
Figura 7 – Esquema de medição feito por Ingård e Bolt (1951). A sonda pode se mover pela superfície normal à amostra.	31
Figura 8 – Planos de medição usados por Tamura (1990)	33
Figura 9 – Esquema de medição usado por Champoux <i>et al.</i> (1997)	36
Figura 10 – Esquema de medição usado por Ducourneau <i>et al.</i> (2009)	37
Figura 11 – Propagação de ondas esféricas sobre uma superfície plana.	41
Figura 12 – Microfone Gras 26CA	45
Figura 13 – Alto-falante Yamaha HS5	45
Figura 14 – Sistema de aquisição LMS Scadas	45
Figura 15 – Sistema de microfones acoplados para calibração	46
Figura 16 – Arranjo de microfones com distância coprimas (QIN <i>et al.</i> , 2015) usado nas medições	47
Figura 17 – Sistema de medição na câmara anecoica FEM. Arranjo de microfones com distância coprima (JABLONSKI, 1986) mais fonte	47
Figura 18 – Planta do sistema de medição na câmara anecoica FEM.	48
Figura 19 – Impedância característica (a), impedância de superfície (b) e coeficiente de absorção (c) da melamina, simulado de acordo com o modelo de Allard e Champoux (1992).	50
Figura 20 – São apresentados 4 sinais, um para cada posição de microfone, obtidos pelo modelo da Equação (4.3) para a reflexão causada por um material com as características da melamina.	52
Figura 21 – Aplicação do SLIM (XU <i>et al.</i> , 2013) no campo acústico “sintético” em um ambiente com material poroso (melamina), para encontrar a posição das fontes de onda sonora.	52
Figura 22 – Aplicação do RELAX (WANG <i>et al.</i> , 2004a) no campo acústico “sintético” em um ambiente com material poroso (melamina), para recuperar a energia sonora sem distorções.	53

Figura 23 – Comparação dos valores téóricos dos parâmetros acústicos e dos valores simulados para uma medição com quatro microfones a partir do campo acústico sintético com uma amostra de melamina.	54
Figura 24 – Simulação numérica do campo acústico sintético e sua recuperação pelos métodos SLIM e RELAX para uma amostra de lã de rocha.	56
Figura 25 – Comparação dos valores téóricos dos parâmetros acústicos e dos valores simulados para uma medição com quatro microfones a partir do campo acústico sintético com uma amostra de lã de rocha.	57
Figura 26 – Simulação numérica do campo acústico sintético e sua recuperação pelos métodos SLIM e RELAX para uma amostra de lã de vidro.	58
Figura 27 – Comparação dos valores téóricos dos parâmetros acústicos e dos valores simulados para uma medição com quatro microfones a partir do campo acústico sintético com uma amostra de lã de vidro.	59
Figura 28 – Diferença de amplitude e fase nos microfones.	61
Figura 29 – Gráfico da Amplitude x Posição angular extraída com o algoritmo SLIM, para amostra posicionada em 0° (superior esquerda), 30° (superior direita), e assim por diante até 180° (inferior) em relação ao arranjo.	62
Figura 30 – Pressão sonora medida na câmara anecoica da FEM para madeira.	64
Figura 31 – Aplicação do RELAX no campo acústico na câmara anecoica da FEM, em um ambiente com material rígido (madeira), para recuperar a energia sonora.	64
Figura 32 – Medição do sinal do tempo e sua recuperação com SLIM e RELAX para uma amostra de lã de rocha medida na câmara anecoica da FEM.	65
Figura 33 – Comparação dos valores téóricos dos parâmetros acústicos e dos valores medidos na câmara anecoica da FEM da lã de rocha com quatro microfones.	66
Figura 34 – Medição do sinal do tempo e sua recuperação com SLIM e RELAX para uma amostra de lã de vidro medida na câmara anecoica da FEM.	67
Figura 35 – Comparação dos valores téóricos dos parâmetros acústicos e dos valores medidos na câmara anecoica da FEM da lã de vidro com quatro microfones.	68
Figura 36 – Comparação dos coeficientes de absorção para a medição em tubo de impedâncias (ZANONI, 2018) e na câmara anecoica da FEM.	69

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre perdas e ganhos dos diferentes métodos e técnicas para a medição de propriedades acústicas.	38
Tabela 2 – Parâmetros para melamina	51
Tabela 3 – Parâmetros para lã de rocha	53
Tabela 4 – Parâmetros para lã de vidro	55

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Objetivo	17
1.2	Objetivos específicos	17
1.3	Estrutura	17
2	Conceitos básicos	19
2.1	Introdução	19
2.2	Impedância acústica	19
2.3	Coeficiente de reflexão	21
2.4	Coeficiente de absorção	22
3	Medição das propriedades acústica	24
3.1	Introdução	24
3.2	Separação temporal	24
3.3	Ambientes controlados	27
3.3.1	Câmara reverberante	27
3.3.2	Câmara anecoica	29
3.4	Métodos de campo acústico	30
3.4.1	Modelo de onda plana	30
3.4.1.1	Tubo de impedâncias	31
3.4.2	Modelo de onda esférica com reflexão especular	32
3.4.3	Modelo de onda esférica com reflexão total considerando a amostra localmente reativa	32
3.4.4	Modelo de onda esférica com reflexão total considerando a amostra não localmente reativa	32
3.5	Medição <i>in situ</i>	33
3.6	Métodos alternativos	35
3.7	Compilação das vantagens e desvantagens dos método citados	36
4	Fundamentação teórica	39
4.1	Fundamentação teórica aplicada ao método	40
4.1.1	Estimação da impedância de superfície	41
4.1.2	Delay and sum Beamforming	42
4.1.3	Métodos esparsos	43
5	Metodologia	44
5.1	Método de medição	44
6	Resultados	49
6.1	Resultados numéricos	49
6.1.1	Simulação com material poroso - Melamina	49

6.1.2	Simulação com material poroso - Lãs minerais	53
6.1.3	Discussão	60
6.2	Resultados experimentais	61
6.2.1	Medição de material rígido - Madeira	63
6.2.2	Medição material poroso - Lã de rocha	64
6.2.3	Medição material poroso - Lã de vidro	67
6.2.4	Comparação com tubo de impedâncias	69
6.2.5	Discussão	70
6.3	Discussão geral	70
7	Conclusão	72
7.1	Avaliação das metas propostas	72
7.2	Discussões, observações e sugestões	73
	 Referências	 75
	ANEXO A Microfone Gras 26CA	80
	ANEXO B Alto-falante Yamaha HS5	82

1 Introdução

A grandeza física que permite caracterizar a influência da resposta acústica¹ dos materiais é a impedância acústica. Uma definição mais formal da impedância acústica é dada como a medida da oposição, ou resistência, que um sistema apresenta ao fluxo acústico, ou a propagação da onda sonora, resultante de uma pressão acústica aplicada ao sistema, sendo o sistema o material em estudo, desde um pedaço de espuma até uma parede de concreto. No caso desse trabalho o sistema que se opõem a propagação da onda sonora, absorvendo e a refletindo, serão as amostras em estudo.

A medição da impedância acústica ganhou importância nos últimos anos principalmente com a popularização de técnicas de simulação acústica e auralização (VORLÄNDER, 2007), que têm a impedância como um dos seus parâmetros de entrada. O método padrão para caracterização da impedância acústica é usando um tubo de impedância ISO-10534-2 (1998). Este método possui o inconveniente de que as amostras precisam ser cortadas para serem inseridas no tudo, o que acaba resultando, muitas vezes, na destruição da amostra. Uma outra forma padronizada de caracterizar materiais é expondo o material a um campo sonoro reverberante dentro de uma câmara reverberante (ISO-354, 1985). Mas este segundo método permite a caracterização apenas do coeficiente de absorção do material, e não de sua impedância, inviabilizando simulações mais fidedignas. Busca-se então uma forma de realizar a medição da impedância acústica *in situ*, ou seja, com o material intacto e onde o material esta instalado ou aplicado, o que permite examinar os efeitos de montagem de amostra (por exemplo, compressão), os efeitos do tempo (por exemplo, umidade e acúmulo de sujeira), os efeitos do ângulo de incidência da onda sonora (BRANDÃO, 2011), para assim caracterizar diversos tipos de ambientes (TIJS *et al.*, 2009b) e cavidades (por exemplo, automóveis e aviões) (TIJS *et al.*, 2009a).

Os principais métodos de medição *in situ* de impedância acústica são classificados e discutidos em Brandão *et al.* (2015). Estes métodos variam amplamente quanto aos sensores usados nesta tarefa (ALLARD *et al.*, 2014; KRUSE, 2007; JANSSENS *et al.*, 2002). Um dos métodos adapta um tubo de impedância para ser usado *in situ*, de forma a caracterizar a pressão sonora e a velocidade de partícula no final do tubo onde está a amostra (CHAMPOUX *et al.*, 1997). Outros métodos se utilizam de um microfone e aplicam diversas técnicas de processamento de sinais para realizar a medição do coeficiente de absorção (GARAI, 1993) ou coeficiente de reflexão (MOMMERTZ, 1995) através da relação entre as componentes de pressão incidente e refletida observadas no ambiente em estudo. Mais recentemente verifica-se com maior frequência o uso de arranjos de micro-

¹ O conceito de resposta acústica está relacionado a interação da onda sonora com um determinado material, especificamente em quanto dessa onda é absorvido e refletido após a interação.

fonos para medição de impedância (DUCOURNEAU *et al.*, 2009; HADDAD *et al.*, 2016; OTTINK *et al.*, 2016).

Arranjos de microfones permitem realizar uma estimativa do campo acústico incidente sobre si, captando a informação sonora vindo de uma dada direção enquanto o ruído ou as informações provenientes das demais direções são suprimidas (JOHNSON; DUDGEON, 1993). É justamente esta segunda característica que torna o uso de arranjos de microfones interessante para a medição da impedância acústica, dado que este permite segregar a onda incidente da onda refletida e estas duas das demais ondas interferentes.

Apesar de a popularidade de arranjos de microfones ter aumentado consideravelmente nas últimas décadas, sua aplicação para medição de impedância acústica ainda é rara. Essa afirmação será evidenciada no decorrer do Capítulo 3. O aumento no uso de arranjos de microfones pode ser explicado, em parte, pelo fato de que os arranjos são, em geral, pequenos se comparados ao comprimento de onda (comprimento de ondas sonoras audíveis varia de 17m até 0,017m aproximadamente) sob análise e contêm um número reduzido de microfones, o que resulta em uma baixa resolução espacial.

Aumentar a resolução espacial do arranjo sem, contudo, aumentar o número de sensores é, portanto, um grande desafio para tornar o uso de arranjos mais versátil, podendo assim, por exemplo, ser utilizado para para medições *in situ* da impedância acústica. Uma possível maneira de se atingir este objetivo que vem sendo intensamente estudada nos últimos anos são os algoritmos com regularização promotora de esparsidade (YARDIBI *et al.*, 2008), que são técnicas matemáticas que buscam uma melhor resolução espacial usando o conhecimento *a priori* de que o campo sonoro é composto por poucas fontes—como é idealmente o caso quando realizamos medição de impedância acústica *in situ*. Isto resulta em uma localização mais acurada da quantidade e posição das fontes sonoras presentes em um dado ambiente de teste, resultando em uma melhor separação do campo sonoro gerado pela mistura destas (poucas) ondas. Alguns métodos com este intuito já foram propostos para aplicações em imageamento acústico, como Wang *et al.* (2004a), Xu *et al.* (2013), Nascimento *et al.* (2015).

Nesta dissertação propõem-se o uso de um arranjo linear de microfones conjuntamente com uma técnica de separação de fontes com regularização promotora de esparsidade para o cálculo da impedância acústica de materiais.

Primeiramente, o método proposto foi avaliado por meio de simulação. Para tanto, foi modelado o campo acústico gerado por uma fonte pontual frente à presença de uma de amostra não localmente reativa (BRANDÃO, 2016). Isso significa que a amostra em teste possui alto índice de refração, fazendo com que o ângulo de refração se torne pequeno o suficiente para que ele seja independente do ângulo de incidência. Assumimos que o campo acústico gerado era formado por ondas planas, assim é necessário obter a onda incidente e a onda refletida para o cálculo dos parâmetros acústicos. Esses conceitos

são o suporte para a criação da simulação proposta nesse trabalho. Posteriormente, o método foi validado experimentalmente com um arranjo de microfone.

Para a etapa de medição foi necessário selecionar os materiais a serem medidos. Acredita-se que materiais previamente caracterizados seriam ideais e por esta razão foram escolhidas amostras de lã de rocha e lã de vidro (materiais porosos) que foram caracterizadas previamente em tubo de impedâncias (ZANONI, 2018). As medições com estes materiais foram realizadas na câmara anecoica da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade de Campinas (Unicamp). Essa diferente abordagem tem como objetivo, adquirir medidas mais precisas do que os atuais métodos normativos.

1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho é medir a impedância acústica *in situ* usando um arranjo de microfones, buscando trazer benefícios na área de caracterização de propriedades acústicas.

1.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo principal seja atingido as seguintes etapas devem ser realizadas:

1. Criação de um ambiente de teste, através de uma simulação, verificando se o método de medição proposto apresenta resultados consistentes.
2. Teste da simulação para materiais já caracterizados previamente, reafirmando que esse modelo é adequado.
3. Testes com medições em ambientes controlados. Assim, uma verificação mais fidedigna do método de medição é aceitável.

1.3 Estrutura

A seguir resumimos a organização desse documento. No Capítulo 2 é feita uma revisão teórica detalhada elaborando o conceito de impedância acústica, tanto quanto a teoria que envolve alguns métodos para sua medição.

O Capítulo 3 discorre sobre os métodos de medição de impedância acústica de maneira histórica. Aqui são discutidos métodos com grande relevância, tanto por sua importância na literatura quanto por abordarem o problema de maneiras inovadoras,

ressaltando as vantagens e dificuldades encontradas para as diferentes maneiras de realizar a medição da impedância acústica.

O método proposto nesse trabalho, incluindo seu embasamento teórico e a direção escolhida para sua utilização são apresentadas no Capítulo 4. Além de compará-lo com os principais métodos mencionados anteriormente.

No Capítulo 6 São apresentados os resultados da aplicação do algoritmo proposto primeiramente para um cenário simulado, onde é possível validar o funcionamento do método proposto como também para um cenário real, com sinais medidos em câmara anecóica.

Por fim, o Capítulo 7 sumariza os resultados e contribuições desta dissertação e apresenta considerações a respeito de trabalhos futuros.

2 Conceitos básicos

2.1 Introdução

Muitas vezes nos deparamos comparando a sensação de assistir ou ouvir um mesmo conteúdo sonoro (e.g. filme, ou música) em diferentes locais, afirmando que um local era mais agradável para determinada experiência do que outro. Uma situação hipotética seria assistir a uma mesma peça, ou um mesmo concerto musical, em um teatro que possuísse cadeiras de madeira, sendo que em uma das vezes o local estava lotado e na outra estava vazio. Fazendo um raciocínio lógico baseado em nossa intuição, podemos supor que materiais semelhantes (de mesma rigidez) interagem de formas semelhantes com uma onda sonora. Já materiais de rigidez diferente devem interagir de maneira distinta com a onda sonora.

Voltando ao nosso exemplo, e lembrando que cerca de 65% do corpo de um homem adulto é composto de água, logo muito mais próximo de um material flexível do que um rígido, podemos afirmar que uma onda sonora ao se deparar com um ambiente preenchido de forma significativa com seres humanos (que estariam sentados sobre as cadeiras) irá reagir de forma diferente do que quando está preenchido praticamente apenas com cadeiras de madeira. Assim, nossa experiência em cada uma das apresentações será diferente, independente de ter sido mais prazerosa em uma do que na outra, já que isso seria um fator subjetivo. O fator delimitante para essa diferenciação está nos materiais que compunham o ambiente daquele teatro durante as duas apresentações.

Para uma melhor escolha dos materiais de um determinado ambiente, ou na simulação do mesmo, é necessário uma boa estimativa das propriedades acústicas desses materiais. Quando estudamos as propriedades acústicas dos materiais muitas das vezes nos deparamos com essas três propriedades: Impedância Acústica, Coeficiente de Reflexão e Coeficiente de Absorção. Apesar de a princípio parecerem distintas, elas estão correlacionadas. Na realidade, a distinção está no tipo de informação que queremos extrair—quando queremos estimar tempo de reverberação, só nos importa a absorção—ou na facilidade em medir especificamente uma destas características para um determinado sistema (ambiente acústico).

2.2 Impedância acústica

Primeiramente, é importante fazer uma breve diferenciação sobre as diferentes “Impedâncias acústicas” que podem ser encontradas na literatura como em Brandão

(2016).

A *impedância acústica* (Z_a) e a *impedância acústica específica* (Z_m) representam a “dificuldade” imposta à propagação de uma onda de pressão acústica em um dado meio. A primeira (Z_a) está relacionada com a pressão e com velocidade de volume, geralmente mais usada quando tratamos de fontes sonoras, e também é chamada de impedância de radiação. Já a segunda (Z_m) é uma definição relacionada com pressão e com velocidade de partícula. Ou seja, na primeira estamos considerando todo o fluxo de energia acústica por uma superfície enquanto na segunda é definido apenas para um ponto. A *impedância acústica característica* (Z_c) representa como o som se propaga através de um meio finito em campo livre. Por fim, quando existe uma interface entre o ar e um segundo meio denominamos a resistência que essa interface proporciona à passagem de uma onda sonora como a *impedância de superfície* (Z_s).

A impedância acústica (Z_a) pode ser comparada à impedância elétrica, enquanto uma representa uma resistência ao fluxo sonoro a outra representa uma resistência ao fluxo de corrente elétrica, sendo que a formulação da impedância acústica pode ser dada pela relação entre a pressão sonora aplicada (P) e a velocidade de volume (Q), como mostrado na equação

$$Z_a = \frac{P}{Q}. \quad (2.1)$$

A impedância acústica específica (Z_m) é definida como a razão entre as amplitudes complexas da pressão sonora (\tilde{A}) e a velocidade total da partícula (U_z), na direção normal à superfície de estudo. Esta relação é mostrada na equação

$$Z_m = \frac{\tilde{A}}{U_z}. \quad (2.2)$$

Já a impedância característica (Z_c) oferece informações do comportamento acústico do meio, sendo definida como o produto da densidade característica ($\rho(\omega)$) pela velocidade de propagação ($c(\omega)$) onda sonora no meio em estudo, como na equação

$$Z_c = \rho(\omega)c(\omega). \quad (2.3)$$

Por fim, a impedância de superfície (Z_s) de uma amostra com espessura (d_1) é dependente das propriedades intrínsecas do material, como a impedância característica (Z_c) e o número de onda (k_1). A impedância de superfície é representada matematicamente por

$$Z_s = -i \frac{Z_c}{\cot(\theta)} \cot(k_1 d_1 \cos(\theta_t)) \quad (2.4)$$

depende do ângulo de incidência da onda sonora no meio de interação. Indiretamente o ângulo de incidência depende do ângulo de refração (θ_t) ilustrado em

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{k}{k_0} = \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta_t)}. \quad (2.5)$$

Essa relação é proveniente da Lei de Snell nos estudos de óptica na física e c_0 é a velocidade do som no ar. Mais informações sobre a da variação do ângulo de incidência no estudo da impedância de superfície serão dados na Seção (3.4.4).

2.3 Coeficiente de reflexão

Uma ilustração da interação da impedância acústica seria quando uma onda sonora que se propaga por um dado meio com impedância Z_1 atinge uma interface entre o meio Z_1 e um outro meio de impedância acústica distinta Z_2 . Neste caso, parte da energia sonora da onda é transmitida para o outro meio Z_2 e parte é refletida para o próprio meio Z_1 . Quando olhamos a variação de pressão sonora no meio Z_1 verifica-se uma mudança no valor da pressão “inicial” (pressão incidente - p_i) que passa a ser a superposição de p_i com uma “nova” pressão (pressão refletida - p_r). Pode-se ainda dizer que a pressão refletida é proporcional à pressão incidente, onde o termo da proporcionalidade é chamado de coeficiente de reflexão, que pode depender do ângulo de incidência θ da onda na interface, medido na interface dos meios, como mostrado na Figura 1. Sua formulação matemática será mostrada posteriormente nessa seção.

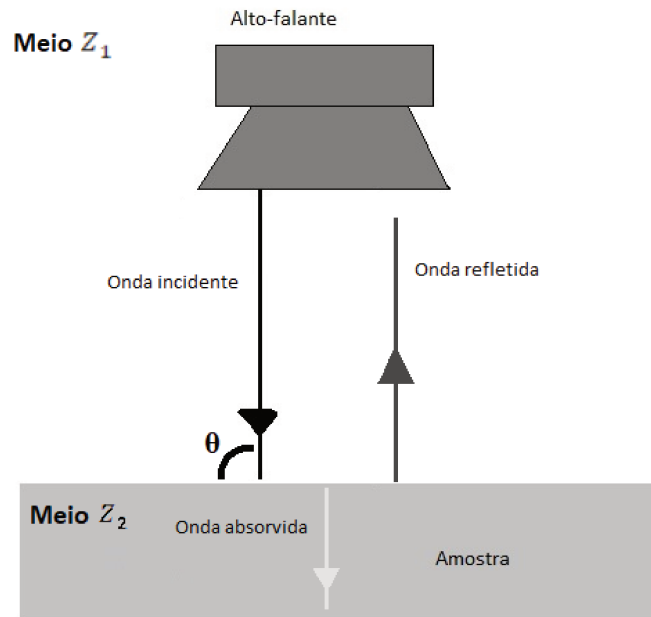


Figura 1 – Esquema da interação de onda sonora com região de impedância

A pressão sonora geradas por uma fonte pontual acústica pode ser representada em sua forma complexa (YUZAWA, 1975) como

$$p = \frac{\tilde{A}}{r} e^{-ikr}. \quad (2.6)$$

O coeficiente de reflexão (R) é dado pela razão entre as amplitudes complexas da onda incidente e refletida, ou seja,

$$R(\theta) = \frac{\tilde{B}}{\tilde{A}}. \quad (2.7)$$

As duas diferentes amplitudes complexas são \tilde{A} para a pressão incidente (p_i) e \tilde{B} para a pressão refletida (p_r). Duas diferentes distâncias r da Equação (2.6) seriam utilizadas para o cálculo de cada uma dessas pressões, já que uma delas representaria a distância percorrida pela onda sonora incidente e a outra pela onda sonora refletida. O número de onda para a onda sonora é representado por k . Importante ressaltar que o caráter oscilatório da pressão sonora é semelhante ao caráter oscilatório da velocidade instantânea da onda sonora.

Além disso, é possível relacionar o coeficiente de reflexão com a impedância através da equação

$$R(\theta) = (Z \cos \theta - \rho_0 c) / (Z \cos \theta + \rho_0 c), \quad (2.8)$$

onde assume-se que o meio de propagação da onda é o ar. Vale notar que o termo $\rho_0 c_0$ descreve a impedância característica do ar Z_0 , sendo ρ_0 a densidade do ar e c_0 a velocidade do som no ar. Importante ressaltar que dependência do ângulo de incidência no coeficiente de reflexão se deve à variação na direção da onda sonora incidente na amostra, resultando em uma variação na amplitude complexa refletida \tilde{B} .

Note que neste trabalho o que pretende-se medir é a impedância de superfície. No restante do texto, a impedância de superfície será chamada simplesmente de “impedância”.

2.4 Coeficiente de absorção

Como é possível notar na Figura 1, além de observamos o problema pelo o que foi refletido depois da interação com o meio de impedância Z_2 , ele permite mais de um tipo de abordagem. No lugar de observamos o quanto da onda original foi refletida, podemos estudar o quanto dessa onda foi absorvida pela amostra. O coeficiente de absorção é a medida de quanto a energia sonora é absorvida por um determinado material ou amostra e é dado por

$$\alpha(\theta) = \frac{|p_i|^2 - |p_r|^2}{|p_i|^2} = 1 - |R(\theta)|^2. \quad (2.9)$$

Importante ressaltar que $R(\theta)$ é um valor complexo enquanto $\alpha(\theta)$ é um valor real. Ou seja, é possível calcular $\alpha(\theta)$ conhecendo $R(\theta)$, porém o contrário não é verdade, pois a informação de fase é perdida. Além disto, a relação expressa na Equação (2.8), nos permite relacionar a impedância de um meio com as pressões incidente e refletidas pela interface ar/meio.

Quando uma amostra sofre incidência de diversos ângulos (e.g. salas de aulas) é mais comum a utilização do coeficiente de absorção por incidência difusa α_s . Ou seja, nesse caso a amostra está sendo excitada de todas as direções por ondas sonoras. O coeficiente de absorção por incidência difusa é representado em sua forma matemática por

$$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \sin(2\theta) d\theta. \quad (2.10)$$

Nota-se que o cálculo de α_s é feito pela soma dos diferentes valores que $\alpha(\theta)$ possui para os diferentes ângulos de incidência θ . Desta forma, pode-se concluir que, sabendo o $\alpha(\theta)$ para os diversos ângulos é possível obter α_s , apesar disso o inverso não é verdade. Não é possível estimar $\alpha(\theta)$ para um θ específico sabendo somente o valor de α_s .

3 Medição das propriedades acústica

3.1 Introdução

Nos últimos anos, a comunidade científica que trabalha na área de acústica vem dando importância para a questão da medição da impedância da superfície e o coeficiente de absorção de materiais. Para fornecer uma visão geral e organizada, este capítulo tem como objetivo fornecer uma revisão sobre o problema de medição de impedância acústica. Destacando os principais ou mais memoráveis métodos, além de discutir quais são as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos considerados. O leitor será deparado com informações de caráter histórico e de maneira concisa.

As características mencionadas no Capítulo 2 são as bases para a maior parte dos métodos de medições da impedância acústica. Existem diversos métodos para se estimar a impedância acústica e os principais deles são citados na revisão feita em Brandão *et al.* (2015). A importância da escolha do método adequado está no fato de que, quanto melhor a caracterização da impedância acústica, melhor será o resultado das simulações de ambientes acústicos.

Para melhor organizar este capítulo os métodos de medição foram agrupados de acordo com cinco características principais: uso de técnica de separação temporal, uso de ambientes controlados, uso de técnicas de campo acústico, medições *in situ* e características alternativas. É importante ressaltar que estas características não são excludentes, isto é, é possível que um mesmo método de medição pertença a mais de uma das classes listadas.

3.2 Separação temporal

Em linhas gerais pode-se classificar esses métodos como aqueles que usam recursos de processamento de sinais para permitir a separação das pressões sonoras incidente e refletida. As especificidades de cada um dos métodos aqui mencionados serão detalhadas com o decorrer da seção.

Um dos métodos mais antigos para a medição de impedância foi realizado por Yuzawa (1975), onde é proposto um método de separação com dois microfones conforme exemplificado na Figura 2. O microfone M_1 está localizado longe da amostra, medindo os valores da pressão incidente $p_1 = p_i$. O outro microfone M_2 está posicionado perto da amostra, medindo a superposição da pressão incidente e refletida $p_2 = p_i + p_r$. A pressão refletida era extraída somando-se p_2 com uma versão de p_1 de fase invertida. Nesse caso

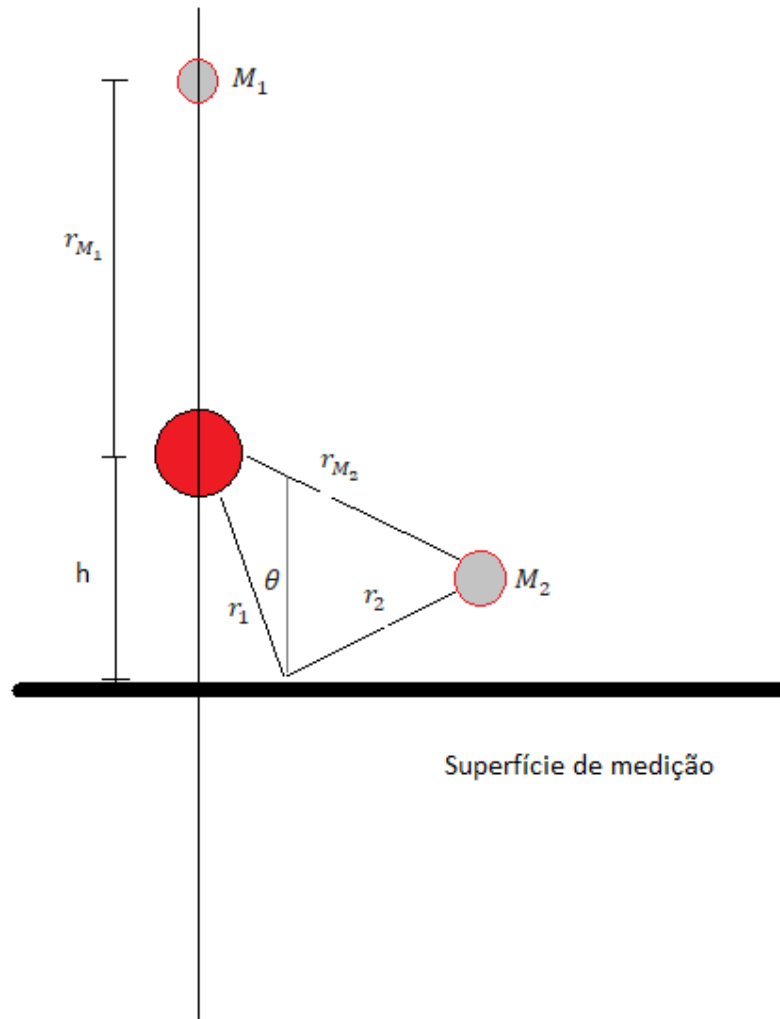


Figura 2 – Esquema da técnica de separação proposta por Yuzawa (1975)

foi utilizado um alto-falante que emitia um ruído branco numa banda de 500 até 4000 Hz.

Posteriormente, em Davies e Mulholland (1979), foi utilizado um ruído impulsivo como o sinal de excitação e somente um microfone. Para isso eles realizaram duas medições, uma em campo livre sem a amostra e a outra com o microfone próximo à superfície da amostra. A primeira medição foi feita para se obter a pressão incidente, já a segunda para se obter a pressão total (pressão incidente mais refletida).

Ambos os métodos apresentados se valem de múltiplos microfones ou múltiplas medidas para realizar a separação da onda incidente e da onda refletida, o que acaba tornando o método mais demorado e propenso a erros. Afinal, algumas características do sistema podem ser alteradas de uma medição para outra (e.g. umidade, temperatura, velocidade do som). Uma alternativa para tentar controlar esses problemas são métodos que utilizam técnicas de processamento de sinais para realizar esta separação. Um dos

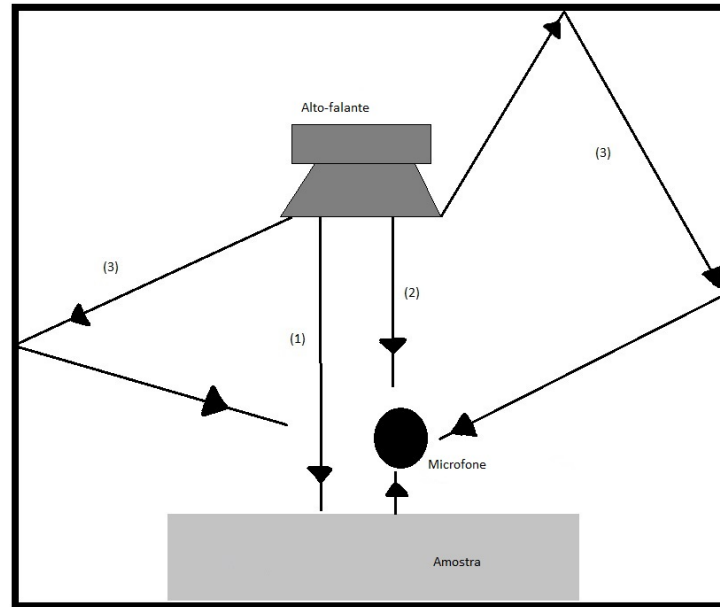


Figura 3 – Esquema de medição usado por Mommertz (1995). (1) Som refletido pela amostra. (2) Onda incidente. (3) Reflexão espúria.

primeiros métodos deste tipo, proposto por Garai (1993), utilizava uma fonte sonora e apenas um microfone (cf. Figura 3). Ele utiliza de uma técnica de separação baseada em uma janela temporal do sinal medido para obter a pressão refletida e a pressão incidente.

Em Mommertz (1995) é proposta uma adaptação à técnica apresentada por Garai (1993), onde a medição da amostra era feita para diferentes ângulos de incidência, mantendo, no entanto, a disposição de fonte e microfones, como ilustrados na Figura 3. Como é mostrado na equação (2.9) o coeficiente de absorção é dependente do ângulo de incidência (θ). A modelagem do sinal é feita da seguinte forma: assume-se um sinal f_1 emitido pela fonte que será refletido pela sala (gerando o sinal f_2) e também pela amostra (gerando o sinal f_3). Por fim, todos esses sinais incidirão sobre o microfone, resultando no sinal $f_M = f_1 + f_2 + f_3$, cuja estrutura temporal pode ser vista na Figura 4. O som direto e o som refletido pela amostra costumam percorrer um caminho acústico menor que o som refletido pela sala até chegar ao microfone, com isso, a influência das reflexões do ambiente (f_2) no sinal total podem ser excluídas utilizando-se uma janela temporal adequada. O som direto também pode ser estimado realizando-se uma medição da função de transferência fonte-microfone em campo aberto, permitindo que a influência do som direto seja eliminada do sinal janelado por uma mera subtração, resultando no sinal refletido pela amostra (f_3). Apesar de sua simplicidade, verifica-se que esse método possui resultados válidos somente para amostras razoavelmente grandes e que variações de umidade e temperatura entre a medição em campo aberto e com a amostra podem afetar significativamente os resultados, inclusive por alterar a velocidade do som.

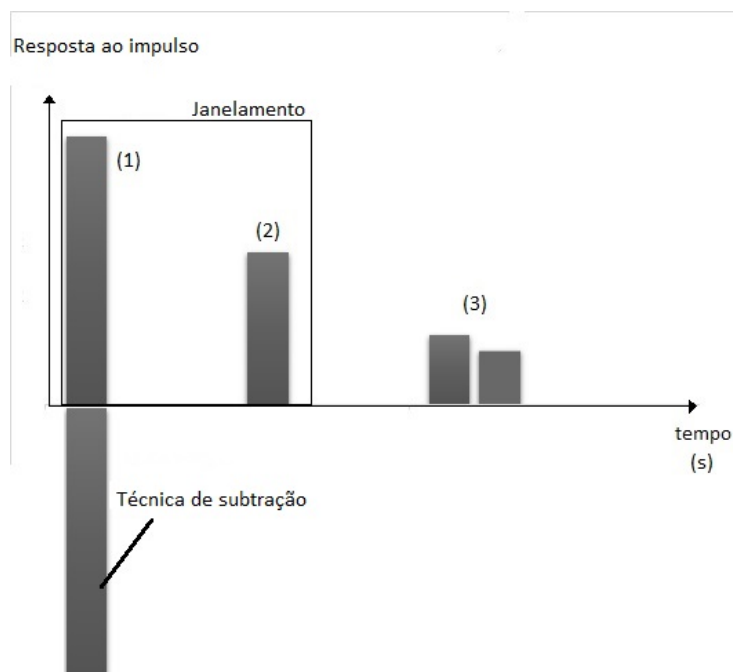


Figura 4 – Método de subtração realizado por Mommertz (1995) com o esquema da Figura 3.

3.3 Ambientes controlados

Ambientes controlados são locais especialmente projetados para garantir a existência de um campo acústico desejado, que facilite o processo de medição. Nesse trabalho serão citados três tais ambientes: câmara reverberante, câmara anecoica e tubo de ondas planas. Importante notar que em alguns dos métodos mencionados na seção sobre métodos que utilizam modelos acústicos podem vir a utilizar algum desses recursos.

3.3.1 Câmara reverberante

Câmaras reverberantes são ambientes especiais com o objetivo de gerar um campo acústico difuso, ou seja, aquele em que a pressão sonora é distribuída de maneira uniforme. Quando o campo é difuso, a energia sonora se propaga em todas as direções com igual probabilidade, ou seja, não existe uma direção preferencial de propagação. Para isso elas geralmente são construídas em ambientes volumosos, com paredes rígidas (reflexivas). Muitas vezes a tinta utilizada na pintura possuem propriedades que fazem com que elas consigam cobrir os poros dos tijolos ou concreto, deixando a câmara ainda mais reflexiva. Um exemplo de câmara reverberante é representada na Figura 5. Como o campo gerado dentro dela é difuso, o coeficiente de absorção medido neste ambiente será o coeficiente de absorção por incidência difusa, como apresentado na Equação (2.10).

O método de medição do coeficiente de absorção em câmara reverberante é descrito na norma ISO-354 (1985). O processo consiste em se medir o tempo de reverbe-



Figura 5 – Câmara reverberante da Faculdade de engenharia mecânica da UNICAMP

ração¹ da câmara vazia ($T_{60\text{sala}}$) e da câmara com a amostra posicionada em seu interior ($T_{60\text{amostra}}$). O coeficiente de absorção é dado por

$$\alpha_s = \frac{0.161V}{S} \left(\frac{1}{T_{60\text{sala}}} - \frac{1}{T_{60\text{amostra}}} \right) - 4V(m_2 - m_1), \quad (3.1)$$

onde V é o volume da sala, S é a soma das áreas de todas as superfícies expostas a incidência de onda sonora da amostra e m é o coeficiente de absorção do ar calculado em cada uma das condições climáticas (e.g. temperatura e umidade).

¹ O tempo de reverberação é o tempo necessário para que a energia sonora decaia em 60 dB após a fonte sonora ser interrompida. O tempo de reverberação é comumente denominado de T_{60} .

Figura 6 – Câmara anecoica da Faculdade de engenharia mecânica da UNICAMP

3.3.2 Câmara anecoica

Câmaras anecoicas são ambientes especialmente projetados para evitar reflexões sonoras (pode ser compreendido como um ambiente funcionalmente oposto a uma câmara reverberante). Idealmente, estes ambientes são isolados de fontes externas de ruído, fazendo com que consigam simular aspectos de um espaço aberto (em todas as direções, caso seja perfeitamente anecoica) de dimensão infinita. Essa é uma característica útil quando influências externas podem interferir nos resultados, ou quando se pretende simplificar o sistema de estudo. Um exemplo de câmara anecoica é representada na Figura 6.

Geralmente, as câmaras anecoicas são constituídas de materiais porosos (material absorvedor) de matrizes de peças piramidais, com as pontas apontadas para dentro da câmara. Para ser eficiente, é necessário que toda a superfície interna da câmara anecoica seja recoberta com este material fonoabsorvente. Uma variante bastante comum é a câmara semi-anecoica, quando o chão não é recoberto com os materiais fonoabsorventes.

A dispersão da onda sonora pode ocorrer de forma coerente, i.e. ondas refletidas em fase, porém essas são direcionadas para longe do receptor. Ou de forma incoerente, i.e. ondas refletidas fora de fase, possuindo uma intensidade menor e podendo ser direcionadas para o receptor. Dependendo do material poroso usado, pode ser que a estrutura dessa espuma também realize interferência destrutiva. O formato piramidal são realizados em determinados ângulos com o objetivo de aumentar o número de vezes que a onda sonora reflete na estrutura, fazendo com que ela passe repetidas vezes pelo material poroso e assim voltando com uma intensidade cada vez menor.

Como toda a energia sonora tende a diminuir, ou seja, está indo para longe da fonte, as câmaras anecoicas são ótimas para se conduzir experimentos em condições semelhantes à de campo livre. O interior de uma câmara anecoica possui ruído na faixa de 10 à 20 dBA. Alguma das funções mais usuais se dá na medição de funções de transferências ou na diretividade de aparatos de áudio (e.g. alto-falantes) ou equipamentos industriais.

Dado que as câmaras anecoicas são um ambiente controlado, onde não existirão reflexões espúrias, elas tornam a obtenção dos parâmetros de onda incidente e onda refletidas por uma amostra mais fidedignos. Sendo assim, um ambiente adequado para a obtenção da impedância de amostras em testes.

Como a câmara anecoica é um ambiente com ausência de reflexões espúrias, a obtenção do som incidente e refletido através de métodos que utilizam de separação por janelamento temporal (MOMMERTZ, 1995) tenham um desempenho favorável.

3.4 Métodos de campo acústico

Quando falamos do comportamento de uma onda sonora sabemos que esse comportamento pode ser diferente dado o ambiente que ela se encontra. Ou seja, ela pode se comportar como uma onda plana ou uma onda esférica, ou até mesmo ter comportamento de onda plana inicialmente mas ao interagir com um determinado material esse comportamento pode ser alterado para um comportamento diferente. Cada uma dessas formas de abordar o comportamento da onda sonora são extremamente relevantes quando temos como objetivo a estimação da impedância acústica de um material. Em situações controladas como as mencionadas na Seção (3.3), teremos um comportamento de onda controlado também, enquanto que em situações onde não é possível prever como uma onda sonora se comporta exatamente os modelos matemáticos envolvidos tendem a ficar bem mais complexos.

Alguns métodos buscam informações do campo acústico para um determinado ambiente, podendo escolher um ambiente controlado ou até mesmo fazer medições em ambientes complexos como nos casos das medições *in situ* (Seção 3.5). Algumas das citações a seguir podem mesclar as informações dadas na Seção 3.3 com a estimação de um modelo de campo acústico.

3.4.1 Modelo de onda plana

Os métodos aqui mencionados assumem que as informações do campo acústico no ambiente são formadas por ondas planas. Dessa forma, os dados se tornam imprecisos quando estudados próximos à amostra, além de erros nas baixas frequências. Alguns dos problemas encontrados nas bandas de baixa frequência são que o tamanho da onda que se propaga é muito grande (e.g. para uma onda de frequência de 40Hz teremos um comprimento de onda próximo de 8,5m), logo seria necessário construir ambientes muito grandes para comportar de forma adequado estas ondas de baixa frequência para um estudo refinado, além do fato de que a média distância (de 5 a 10m) estas ondas se comportam como uma onda esférica. Porém, a matemática se torna simples para regiões afastadas (onde a aproximação para onda plana é mais adequada) trazendo um ganho instrumental.

Ingård e Bolt (1951) utilizaram um método onde uma fonte sonora colocada longe da amostra em uma câmara anecoica era usada. Dessa forma, a aproximação para onda plana se torna consistente. O sensor foi um microfone colocado através da amostra. Sides e Mulholland (1971) foram inspirados por esse trabalho e o adaptaram para um tubo de impedâncias com uma sonda. Em experimentos com tubo de impedâncias a aproximação da emissão de ondas planas é muito adequada devido à distância da amostra como já foi mencionado. A Figura 7 ilustra o método.

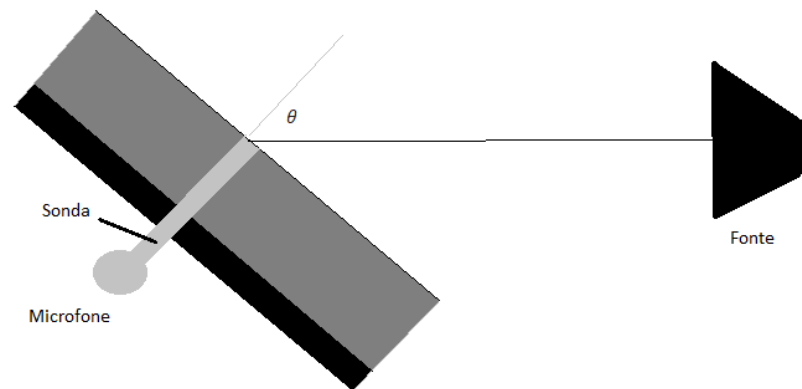


Figura 7 – Esquema de medição feito por Ingård e Bolt (1951). A sonda pode se mover pela superfície normal à amostra.

3.4.1.1 Tubo de impedâncias

Neste método usa-se um tubo que possui um alto-falante localizado em uma das suas extremidades e a amostra a ser medida localizada na extremidade oposta. Uma sonda com um microfone na ponta pode se movimentar ao longo do tubo de impedância e uma escala determina sua posição em relação à origem, considerada como sendo a superfície da amostra. O alto-falante excita o tubo, geralmente com um sinal senoidal de frequência conhecida. O ambiente dentro do tubo garante, para uma dada faixa de frequência, que existe apenas uma onda plana se propagando pelo tubo, permitindo a medição de forma simples do coeficiente de reflexão e da impedância.

Devida às dimensões do tubo, a uma certa distância do alto-falante, pode-se considerar o campo acústico composto por ondas planas e a superposição das ondas incidente e refletida formam uma onda estacionária. Com a medição dos valores absolutos dos máximos e mínimos de pressão, pode-se obter o módulo do coeficiente de reflexão da amostra, e medindo-se as distâncias da superfície da amostra em que esses máximos e mínimos ocorrem, pode-se calcular a fase do coeficiente de reflexão (KUTTRUFF, 2006).

Por ser necessário o recorte da amostra para que ela consiga ser adequadamente posicionada no tubo para medição, algumas características da amostra podem ser perdidas, alterando o valor da impedância que ela possuiria antes do recorte ou quando pertencia a um determinado ambiente.

Dentro da região do tubo de impedâncias é gerado um ambiente com uma onda plana se propagando, que dará origem a uma onda estacionária após a reflexão desta pela amostra. Dessa forma, é possível calcular o valor do coeficiente de reflexão com o uso de 1 ou mais microfones, que permitem a medição da pressão em diferentes posições do tubo. Por fim, com o valor do coeficiente de reflexão é possível inferir o valor da impedância do

material.

3.4.2 Modelo de onda esférica com reflexão especular

Com a necessidade de se obter resultados mais precisos para situações mais complexas, ou seja, não utilizar métodos que assumam o campo acústico formado pelo modelo de ondas planas, em Champoux *et al.* (1988) fizeram simulações onde o modelo considerava que o campo acústico era composto de ondas esféricas que refletiam como ondas planas. Assim, as atenuações geométricas e mudanças de fase devidas à propagação esféricas são consideradas.

Posteriormente em Allard *et al.* (2014) fizeram comparações do modelo de ondas planas com esse novo modelo e concluíram que os resultados de medição de impedância de superfície com melhor precisão eram obtidos para ângulos de incidência entre 0° e 75° e para frequências superiores a 300 Hz.

3.4.3 Modelo de onda esférica com reflexão total considerando a amostra localmente reativa

Nesse fluxo de ideias, aparentemente admitir ondas esféricas refletidas pela amostra é a maneira mais elaborada de considerar o campo acústico de um determinado local, levando a formulações matemáticas muito complexas e acarretando em outras dificuldades como: necessidade de procedimentos de medições mais precisos e algoritmos complexos para se obter a impedância de superfície (resultando também em um gasto computacional elevado).

Esse modelo pode ser exemplificado no trabalho de Tamura (1990), onde seus resultados mostraram menos influência por erros causados pelo tamanho finito da amostra. Nesse procedimento, Tamura utiliza da Spatial Fourier Transform (SFT), onde não há premissas sobre o campo acústico ser simples (onda plana por exemplo). As medições são feitas em relação à natureza do campo sonoro, onde a decomposição das pressões sonoras (pressões sonoras incidentes e refletidas) são medidas em dois planos (para valores de $z = A1$ e $z = A2$) acima da amostra. O sistema utilizado por Tamura é ilustrado na Figura 8.

3.4.4 Modelo de onda esférica com reflexão total considerando a amostra não localmente reativa

Os exemplos dados até o momento assumem a medição de amostras reagindo localmente, isto é, uma amostra que possui alto índice de refração. O ângulo de refração (θ_t) depende da razão entre os números de onda de dois meios diferentes, como pode

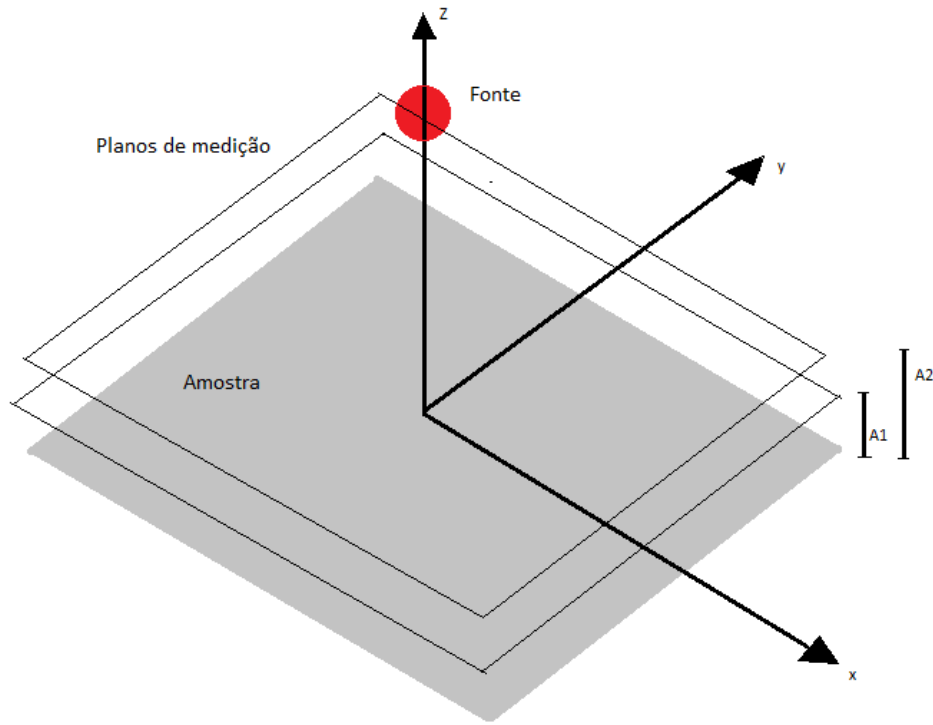


Figura 8 – Planos de medição usados por Tamura (1990)

ser visto na Equação (2.5). Esses valores são independentes da forma de como a amostra é montada. Quando o índice da amostra é suficientemente grande, ou seja $c_0 \gg c$, o ângulo de refração se torna pequeno, fazendo com que $\cos(\theta_t) \approx 1$ tornando-o independente do valor do ângulo incidente (θ). Assim, nesse caso especial em que a impedância de superfície (Equação (2.4)) da amostra é independente de θ , a amostra é chamada de localmente reativa (BRANDÃO *et al.*, 2013).

Brandão *et al.* (2012) investigaram os efeitos de assumir que uma amostra com um índice de baixa refração é localmente reativa, em relação à determinação do coeficiente de absorção através de medições. Utilizando de um algoritmo iterativo, foi demonstrado que esse tipo de amostra leva à superestimação do coeficiente de absorção. Os autores também mostraram que, em uma camada com espessura constante apoiada em uma parede rígida, o aumento do fluxo de resistividade favorece a reação local.

3.5 Medição *in situ*

O termo "*in situ*" é Latim para "em sítio", significando que é feita no próprio local, como dentro de um automóvel, um auditório ou uma sala de concertos. Dessa forma, as técnicas de medição *in situ* são atraentes por não exigirem ambientes especiais, como um tubo de impedância ou uma sala reverberante. Além disso, esse tipo de técnicas de medição são a única opção disponível quando se deseja caracterizar a impedância do solo

ao ar livre.

Ao contrário dos métodos padronizados de medição de impedância e absorção (ISO-10534-2, 1998; ISO-354, 1985) a medição *in situ* permite que as propriedades acústicas de uma dada amostra sejam tomadas no local onde este material está aplicado, o que, por sua vez, permite uma averiguação de efeitos da montagem da amostra (e.g. compressão), dos efeitos do tempo (e.g. acúmulo de umidade e sujeira), dos efeitos do ângulo de incidência da onda sonora (CARNEIRO, 2011), bem como serve para a caracterização de diversos tipos de salas (TIJS *et al.*, 2009c) e cavidades (e.g. automóveis e aviões) (TIJS *et al.*, 2009a). Adicionalmente, a medição *in situ* vem ganhando importância nos anos recentes, principalmente com a popularização das técnicas de auralização² (VORLÄNDER, 2007).

Existem diversos métodos já bastante utilizados para realizar a medição *in situ*. Dentre esses métodos podem-se destacar os explicitados nas referências (ALLARD; SIEBEN, 1985; KRUSE, 2007; JANSSENS *et al.*, 2002), que usam dois ou mais microfones, e os explicitados nas referências (LANOYE *et al.*, 2006), (CARNEIRO, 2011) que utilizam uma sonda PU (sensor que mede no mesmo ponto pressão e velocidade de partícula). Em suma, esses métodos utilizam um alto-falante emitindo um sinal conhecido, de forma que a função resposta em frequência (FRF) entre os sinais medidos pelos sensores possa ser obtida. Um modelo matemático do campo acústico frente à amostra é então usado para calcular a impedância de superfície da amostra. As referências (BRANDÃO, 2011; BRANDÃO *et al.*, 2012; BRANDÃO *et al.*, 2011; BRANDÃO *et al.*, 2015), embora focadas na medição com sonda PU, permitem observar que uma série de fundamentos precisam ainda ser avaliados para tornar a medição *in situ* da impedância acústica uma ferramenta de análise mais confiável. Brandão *et al.* (2012) demonstraram que a medição é bastante sensível ao modelo matemático usado para descrever o campo acústico próximo à amostra medida.

A análise da literatura permite concluir que, embora avanços significativos tenham sido alcançados nos últimos anos, ainda existem uma série de análises e desenvolvimentos necessários para tornar algumas técnicas de medição mais confiáveis (BRANDÃO *et al.*, 2011). Um desses exemplos é a utilização de arranjos para a medição de impedância. A utilização de técnicas de filtragem espacial permite que o arranjo seja “apontado” para a direção de reflexão especular da onda sonora que incide na amostra (FONSECA, 2013). Por exemplo, o arranjo utilizado na referência (FONSECA, 2013) era um arranjo linear (microfones dispostos em uma linha) e sofre dos problemas típicos desse caso. Por esse motivo, essa pesquisa focará no uso de arranjos lineares aliados a técnicas mais complexas de processamento de sinais que podem ser otimizados a fim de se aumentar a exatidão

² Auralização, ou também auralização ou audibilização, é um termo utilizado para técnicas que tornam um campo sonoro audível por modelagem física ou matemática da fonte sonora, do ambiente e do ouvinte.

da medição *in situ* da impedância acústica. Esse é um tema ainda pouco explorado na literatura (RICHARD *et al.*, 2016) e com grandes potenciais de pesquisa e aplicação.

3.6 Métodos alternativos

A maior parte dos métodos citados até o momento obtêm a impedância acústica por uma separação temporal da pressão sonora incidente e refletida, com o uso de técnicas de processamento de sinais ou através de algoritmos que são baseados numa formulação matemática do campo acústico. Ambos utilizam de uma quantidade pequena de microfones, de um a pouco mais de um par. Nessa seção métodos que não apresentam esses tipos de abordagens serão citados.

Em 1997 um bom sensor de velocidade de partícula estava disponível, isso possibilitou a criação de uma sonda (PU–Particle velocity) que possuísse tanto um microfone quanto um sensor de velocidade. Como foi mostrado na Equação (2.2), a impedância acústica específica pode ser dada pela razão da pressão sonora e da velocidade total da partícula na direção normal com a interface, e com o uso da sonda PU surgiu uma nova maneira de caracterizar a impedância na superfície acima da amostra. Esse método também necessitava de uma escolha de modelo acústico do ambiente. Lanoye *et al.* (2006) realizou um estudo utilizando de métodos de calibração para a sonda PU percebendo relação com às medidas de impedância.

Em Champoux *et al.* (1997) foi proposto um método que combina a medição *in situ* com o tubo de impedâncias, exemplificado na Figura 9. Utilizando de dois microfones no tubo de impedâncias para estimar a pressão sonora e a velocidade de partícula no final do tubo (onde está a amostra). Com essa condição de contorno e com a medição de uma terceira pressão sonora acima da amostra, um método iterativo foi utilizado para obter a impedância característica e o número complexo de onda dos poros da amostra.

Em Morgan e Watts (2003) foi implementado um sistema adaptado de Garai (1993) para tomar medidas com uma fonte sonora em movimento. O sistema possuía um alto-falante e um microfone, que estavam conectados a um veículo. O veículo se movimentou com velocidades até 30 km/h. Foi concluído que o método tendia a superestimar o coeficiente de absorção, e acima de 30km/h a turbulência do ar causava efeitos negativos, levando a resultados inaceitáveis.

Em Takahashi *et al.* (2005) foi usado o próprio ruído ambiente como fonte de excitação para a medição de impedância. A diferença se encontra no fato de que a maior parte dos métodos mencionados utilizavam de uma fonte sonora impulsiva, ou um ruído estacionário estável projetado para medição (e.g. ruído branco, varredura exponencial, etc.). Neste exemplo o sinal de excitação utilizado representa o ruído ambiente sem diretividade forte, isso acarreta em uma vantagem descoberta pelos autores de que alguns

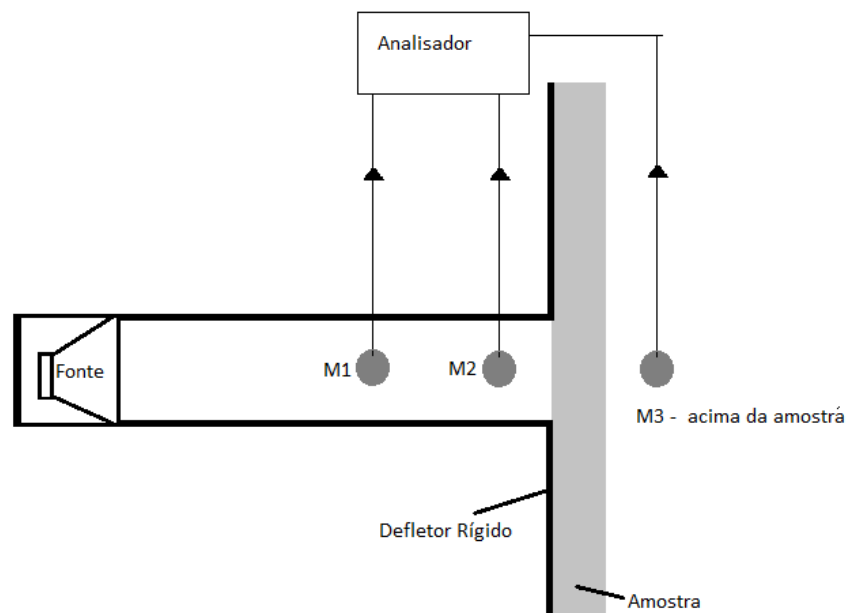


Figura 9 – Esquema de medição usado por Champoux *et al.* (1997)

modos acústicos do ambiente não são excitados. Os resultados para frequências acima de 400Hz se mostraram de acordo com resultados prévios de outros estudos usados como referência. Esse método não necessita de uma grande amostra e fornece a impedância de superfície em campo difuso. No entanto, alguns problemas permaneceram, como: limitação de baixa frequência, imprecisão com matérias pouco absorventes, utilização de equipamentos complicados quando utilizados *in situ*.

Os métodos apresentados até o momento utilizavam apenas um ou dois microfones. Na tentativa de melhorar os resultados obtidos Ducourneau *et al.* (2009) usou um arranjo mais complexo de microfones, com mais de dois microfones, posicionados como mostrado na Figura 10, para a medição *in situ* do coeficiente de absorção de amostras em uma superfície plana. Essa técnica é baseada na combinação dos sinais medidos pelos microfones. Assim, os autores conseguem apontar o lóbulo principal³ do arranjo em direção à fonte de som (pressão incidente), e em direção a superfície da amostra (pressão refletida) com uma única medida. Os autores utilizaram de janelas temporais para retirar reflexões espúrias (ruído típico de medições *in situ*).

3.7 Compilação das vantagens e desvantagens dos métodos citados

De forma a consolidar e deixar de forma mais sucinta e direta os prós e contras dos métodos ilustrados neste capítulo, foi elaborada a Tabela 1. Esta tabela compara os métodos através de características essenciais, como gasto computacional (diretamente

³ Lóbulo principal está relacionado com a região em que o arranjo possui maior diretividade. Propriedade associada com a característica de direção, tanto de microfones como de fontes sonoras (e.g. alto-falantes).

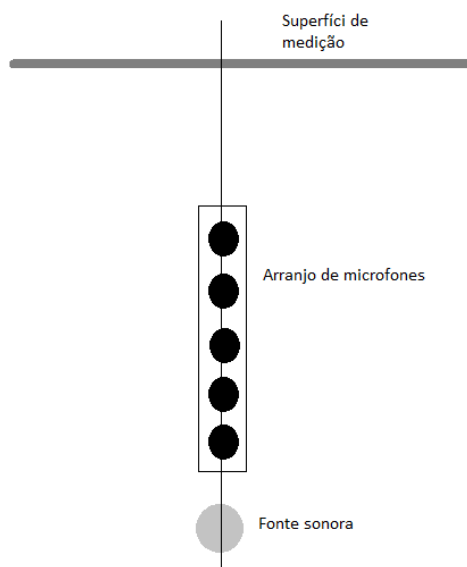


Figura 10 – Esquema de medição usado por Ducourneau *et al.* (2009)

relacionado com a complexidade matemática no método, ou seja, levando a um tempo elevado de processamento dos dados), resultados limitados por aproximações feitas na amostra (e.g. amostra infinita, ou recortada para uso em determinados aparelhos) e limitações devido ao ambiente acústico escolhido. No aspecto do gasto computacional entende-se como um baixo gasto um processamento que demora na ordem de minutos e um alto gasto na ordem de dias. A tabela expressa minha opinião através da análise dos respectivos métodos das referências listadas anteriormente nesse capítulo, quando comparados uns com os outros. É importante ressaltar que a tabela não é uma verdade absoluta, dado que podem existir estudos diferentes aos citados aqui. A principal função da tabela é mostrar quais características você pode esperar ao escolher cada um dos métodos.

Tabela 1 – Comparação entre perdas e ganhos dos diferentes métodos e técnicas para a medição de propriedades acústicas.

Método	Gasto computacional	Aproximações na amostra	Limitações do ambiente acústico	Exemplo
Processamento de sinais (separação temporal)	Dependente de outros parâmetros	Grande aproximação	Limitados	Mommertz (1995)
Câmara Reverberante	Baixo	Grande aproximação	Limitados	ISO-354 (1985)
Câmara anecoica	Baixo	Aproximação moderada	Limitados	Ingård e Bolt (1951)
Tubo de impedâncias	Baixo	Grande aproximação (recorte da amostra)	Limitados	Champoux <i>et al.</i> (1997)
Modelo de onda plana	Baixo	Aproximação moderada	Limitados	Ingård e Bolt (1951)
Modelo de onda esférica - reflexão especular -	Moderado	Aproximações moderadas	Parcialmente limitado	Champoux <i>et al.</i> (1988)
Modelo de onda esférica - reflexão total - - localmente reativa -	Moderado/Alto	Aproximações moderadas	Poucas limitações	Tamura (1990)
Modelo de onda esférica - reflexão total - - não localmente reativa -	Alto	Baixas aproximações	Poucas limitações	Brandão <i>et al.</i> (2012)
<i>In situ</i>	Alto	Poucas aproximações	Poucas limitações	Brandão <i>et al.</i> (2015)

4 Fundamentação teórica

Com as devidas revisões teóricas e histórica feitas nos Capítulos (2) e (3) respectivamente, além de saber os principais pontos negativos e positivos, foi possível escolher a maneira desejada de atacar o problema.

Como foi visto na Seção (3.5) as medições *in situ* são interessantes por não necessitarem de situações especiais, tanto como ambientes pré-montados, quanto como tubos de impedância. Este método tem se tornado bastante aplicável em automóveis e em aeronaves, porém, possui uma gama grande de maneiras diferentes de ser realizado.

Essa linha de pesquisa caminha para o desenvolvimento de novas formas de medições *in situ*. Técnicas essas que precisam ser simuladas, e posteriormente podem ser usadas em medições sucessivas com diferentes amostras. Dessa forma, pode-se verificar suas respectivas vantagens e desvantagens em relação aos métodos até então utilizados para determinadas características do sistema.

Dentre as formas mais inovadoras de medições está a medição de impedância com o uso de arranjos de microfones, que permitem realizar uma estimativa do campo acústico incidente sobre um arranjo. Quando esta informação é exibida na forma de um mapa de cores sobreposta a uma imagem fotográfica, dá-se o nome de imagem acústica ao resultado (JOHNSON; DUDGEON, 1993). Outro uso do arranjo é como um microfone “superdirecional”¹, que permite a captação da informação sonora vindo de uma dada direção enquanto o ruído ou as informações provenientes das demais direções são suprimidas. É justamente esta segunda característica que torna o uso de arranjos de microfones interessante para a medição acústica, assumindo que ela permita segregar a onda incidente da onda refletida e estas duas das demais ondas interferentes.

Mas apesar de a popularidade de arranjos de microfones ter aumentado consideravelmente nas últimas décadas, sua aplicação para medição de impedância acústica ainda é rara. Isso pode ser explicado, em parte, pelas seguintes dificuldades: como os arranjos são, em geral, pequenos se comparados ao comprimento de onda sob análise e contêm um número relativamente reduzido de microfones, a resolução espacial obtida é muito baixa.

Neste trabalho esta dificuldade foi atacada aplicando métodos para aumentar a resolução espacial do arranjo sem, contudo, aumentar o número de sensores. Para esse fim, é necessário uma localização mais acurada das fontes sonoras do ambiente de teste

¹ O termo “superdirecional” se refere ao fato de que a diretividade do arranjo de microfones é bastante grande, fazendo com que eles consigam obter estimar o campo sonoro proveniente apenas de uma pequena região do espaço.

e da estimação correta das energias incidentes e refletidas no meio. Alguns métodos com intuito de localizar as fontes e estimar suas respectivas energias já foram propostos para aplicações de imageamento acústico, como por exemplo Wang *et al.* (2004a), Xu *et al.* (2013), Nascimento *et al.* (2015), que aplicam técnicas de deconvolução para eliminar o efeito da função de espalhamento do arranjo na imagem estimada. Além de também existir possibilidade de se utilizar a técnica de compressive sensing (YARDIBI *et al.*, 2008), que descreve o problema de imageamento como um problema de otimização com regularização de norma promotora de esparsidade²—estes algoritmos dão preferência a imagens esparsas, o que funciona bem desde que o campo acústico seja bem aproximado por um pequeno número de fontes compactas. Deseja-se avaliar como a qualidade da medição da impedância acústica pode ser influenciada pelo uso destes algoritmos quando comparada com os algoritmos padrão de filtragem espacial (como o algoritmo delay-and-sum).

4.1 Fundamentação teórica aplicada ao método

O foco inicial foi construir em Matlab um modelo matemático para simular diversas situações de disposição da fonte, amostra e arranjo de sensores. Inicialmente foi considerada uma amostra de tamanho infinito. Nesta etapa foi possível avaliar a influência dos algoritmos de filtragem espacial no resultado observado.

Para as simulações realizadas foi utilizado o modelo de material poroso apresentado em Brandão (2016), que, por completude do texto, será apresentado a seguir. Assume-se a existência de duas fontes. A primeira é a fonte real (pode ser chamada de fonte objeto devida a semelhança com problemas da óptica física) que gera a pressão incidente sobre a amostra. A segunda fonte é chamada de fonte imagem, nessa abordagem pode-se dizer que a pressão refletida é emitida por ela. Utilizando como referencial o plano que contém a amostra, a posição da fonte imagem é simétrica à posição da fonte objeto em relação ao plano da amostra. Esse esquema é ilustrado na Figura 11 a seguir.

As incógnitas representadas na figura anterior são a distância da fonte real ao microfone r_1 , a distanciada fonte imagem ao microfone r_2 , a distância da fonte real ao vetor normal a superfície sob teste passando pelo microfone r , a distância da fonte real a superfície sob teste h_s e a distância de cada microfone a superfície sob teste h_r . Nota-se que no caso para um arranjo de microfones, os parâmetros anteriores deveriam ser calculados para cada microfone presente no arranjo. As relações entre as distâncias da figura podem ser obtidas por

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (h_s - h_r)^2}, \quad (4.1)$$

² Esparsidade pode ser compreendida como a diferenciação de pontos (informações) que são relevantes para um determinado problema daqueles que não são. Semelhante na diferenciação dos elementos de uma matriz esparsa, matriz essa que possui uma grande quantidade de elementos com valor zero.

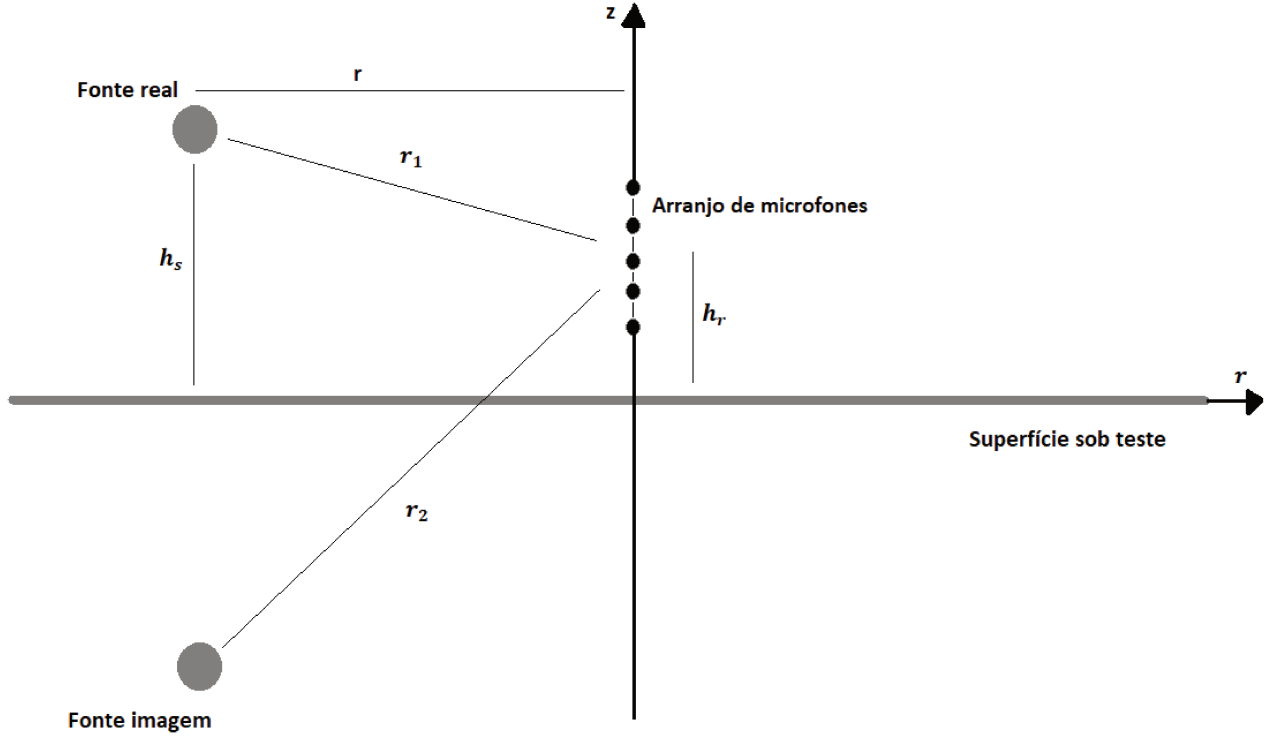


Figura 11 – Propagação de ondas esféricas sobre uma superfície plana.

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (h_s + h_r)^2}. \quad (4.2)$$

Nota-se que, para verificar a confiabilidade do método e dos algoritmos esparsos, mencionados mais à frente nessa seção, as posições iniciais de teste foram com a amostra diretamente oposta a fonte sonora, ou seja, um posicionado em 0° e o outro em 180° .

Quando consideramos a amostra sob teste localmente reativa (Seção (3.4.3)), isso implica que sua impedância de superfície Z_s não varia com o ângulo de incidência θ . A pressão sonora resultante, neste caso, é dada pela Equação (4.3), onde primeiro termo é referente à onda incidente, o segundo termo à onda refletida (fonte imagem) e o terceiro termo se refere à absorção e difração da onda esférica na amostra.

$$p = \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} + \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} - \frac{2k_0 \rho_0 c_0}{Z_s} \int_0^\infty e^{\frac{2k_0 \rho_0 c_0}{Z_s} q} \frac{e^{-jk_0 \sqrt{r^2 + (h_s + h_r - jq)^2}}}{\sqrt{r^2 + (h_s + h_r - jq)^2}} dq; \quad (4.3)$$

Durante este trabalho essa parte da metodologia poderá a ser mencionada como a elaboração do campo acústico “sintético”, por não se tratar de um ambiente real.

4.1.1 Estimação da impedância de superfície

Pela Equação (4.3) nota-se que para o cálculo da pressão total é necessário o conhecimento prévio da impedância de superfície. Para tanto, foi utilizado uma versão do

modelo de Allard e Champoux (1992), onde é possível estimar a impedância característica da amostra segundo as equações

$$Z_c = \sqrt{K\rho_c}, \quad (4.4)$$

$$K = \gamma P_0 \left(\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + \frac{\sigma\phi}{j\alpha_\infty\rho_0 B_2\omega} (1 + \frac{4j\alpha_\infty^2\rho_0 n\omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2})^{1/2}} \right)^{-1}, \quad (4.5)$$

$$\rho_c = \rho_0 \alpha_\infty \left[1 + \frac{\sigma\phi}{j\alpha_\infty\rho_0 B_2\omega} (1 + \frac{4j\alpha_\infty^2\rho_0 n\omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2})^{1/2} \right], \quad (4.6)$$

onde ϕ é a porosidade do material (definido como a razão entre o volume total dos poros e o volume total ocupado pelo material), σ é resistividade ao fluxo (facilidade de um fluxo de ar em penetra e atravessar uma camada do material poroso), α_∞ é a tortuosidade (desvio da orientação dos poros em relação à direção de propagação no interior do material), Λ é o comprimento característico (razão da média entre o volume e a área superficial dos poros do material), $n=1,84 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ é a viscosidade do ar, $B_2 = 0,77$ é o número de Prandtl e $\gamma = C_p/C_v$ é a razão de calores específicos do gás a pressão constante C_p e a volume constante C_v .

Depois de estimada a impedância característica (Z_c) é necessário usar a Equação (2.4) para estimar a impedância de superfície (Z_s) usada na Equação (4.3). Finalizando todas as informações utilizadas na elaboração do código criado no Matlab.

Após a elaboração do código no Matlab foi verificado se a construção do algoritmo estava correta. Para isso foi usado os valores dos parâmetros necessários para a melanina e comparando esses resultados com os encontrados em Brandão (2016). Posteriormente, foi utilizado os valores para a lã de rocha e lã de vidro, para que elas pudessem ser comparadas. Os parâmetros necessários de ambas as lãs podem ser encontrados em Atalla *et al.* (2001), sendo eles utilizados tanto nos cálculos dos parâmetros acústicos simulados, quanto nos medidos.

Por fim, quando se calcula a impedância de superfície a partir do coeficiente de reflexão, Equação (2.8), é preciso corrigir a distância de propagação do centro do arranjo até a amostra. Isso garante que a impedância de superfície realmente está sendo calculada na superfície da amostra.

4.1.2 Delay and sum Beamforming

A técnica do Delay and Sum beamforming (DAS) consiste em atrasar e somar os sinais que chegam a cada sensor, de modo que as fontes localizadas em uma direção de interesse sejam reforçadas e as fontes localizadas em outras direções sejam atenuadas. Como ondas planas apresentam atrasos distintos dependendo da direção em que atingem o arranjo, o DAS propõem compensar esses atrasos alinhando temporalmente os sinais

e tirando a média do resultado da soma, assim ele realça o sinal da direção escolhida atenuando os sinais provenientes das demais direções. O DAS pode ser considerado como simples, mas infelizmente produz imagens com baixa qualidade. Assumindo a suposição de que as fontes estão no campo distante da matriz do arranjo de sensores, o beamforming produz a distribuição de fonte de interesse convoluída com a função de dispersão do arranjo (Point spread function–PSF). Um arranjo acústico padrão tem uma abertura relativamente pequena em relação aos comprimentos de onda de operação, sua PSF pode ser bastante grande, de modo que o atraso e a soma do beamforming produza imagens muito manchadas. Técnicas alternativas de formação de feixes foram desenvolvidas para melhorar a resolução usando métodos dependentes de dados e otimização numérica do padrão de feixe (WANG *et al.*, 2004b; YAN *et al.*, 2007), mas elas não superam a limitação fundamental de que o beamforming produz imagens convoluídas.

Por ser uma técnica extremamente recorrente ela foi usada nesse trabalho como parâmetro de comparação para os outros algoritmos que serão detalhados na próxima seção. Assim é possível verificar qual são as perdas e ganhos de uma técnica sobre a outra.

4.1.3 Métodos esparsos

Como foi mostrado na Figura 11 através do arranjo de microfones precisaremos separar a pressão incidente da refletida, para isso usaremos algoritmos de processamento espacial com regularização promotora de esparsidade. Esses algoritmos não serão detalhados nesse trabalho, apenas suas aplicações e restrições.

Os métodos esparsos SLIM (XU *et al.*, 2013) e RELAX (WANG *et al.*, 2004a), foram utilizados no resultado de campo sonoro na separação das componentes do campo sonoro, onde, em linhas gerais o SLIM (Sparse learning via iterative minimization) é o responsável em identificar a quantidade de fontes e a direção de onde cada onda sonora está vindo, e o RELAX (relaxation algorithm por Li e Stoica (1996)) é responsável pela recuperação do sinal de cada fonte com menor distorção espectral. O uso do algoritmo RELAX se faz necessário porque, como discutido em Xu *et al.* (2013), o algoritmo SLIM tende a distorcer o espectro dos sinais recuperado durante suas interações.

5 Metodologia

5.1 Método de medição

Feita a simulação e a averiguação de se os resultados encontrados eram condizentes, foi possível realizar o próximo passo nessa pesquisa: usar o método proposto em medições reais. Nota-se que os resultados tanto do método numérico como do método experimental serão apresentadas e discutidas no Capítulo 5.

Essa segunda parte do trabalho é a aplicação do modelo de medição elaborado anteriormente para um ambiente real. Para isso, medições foram feitas em bandas de frequência limitada, a princípio, garantindo sempre condição de incidência de ondas planas, já que realizadas na câmara anecoica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp (FEM). Os instrumentos utilizados foram: arranjo de microfones formado por quatro microfones Gras 26CA (com pré-amplificador PCB 583A) (Figura 12), alto-falante Yamaha HS5 (Figura 13), e sistema de aquisição LMS Scadas (Figura 14)—usado para gerar e reproduzir o sinal de excitação e para condicionar e fazer aquisição do sinal dos microfones. O pós-processamento foi todo feito com o software Matlab. Ambos os datasheets do microfone e do alto-falante estão anexados a esse trabalho (Anexo A e Anexo B).



Figura 12 – Microfone Grac 26CA



Figura 13 – Alto-falante Yamaha HS5



Figura 14 – Sistema de aquisição LMS Scadas

Para a etapa de medição foi necessário selecionar os materiais a serem medidos. As lâs de vidro e de rocha foram selecionadas por terem sido caracterizados no tubo de impedâncias no trabalho de Zanoni (2018), além da facilidade na obtenção dessas amostras que já estavam disponíveis no laboratório. Porém, além deles, madeira também foi usada para que o método fosse testado em um material rígido. Isso foi feito para testar o comportamento dos algoritmos esparsos em um material com resultados mais previsíveis. Material em que a onda incidente é majoritariamente refletida.

Primeiramente foi feita uma medição com os quatro microfones, averiguando possíveis diferenças na medição de cada um deles. Um exemplo seria a diferença na fase



Figura 15 – Sistema de microfones acoplados para calibração

de cada um. Através dessa medição foi possível ponderar as medições subsequentes levando em consideração a resposta em frequência de cada microfone, tornando os dados subsequentes equivalentes (Figura 15). Foi observado que se o nível do alto-falante estivesse muito elevado ele passava a distorcer o sinal, já que passava a existir a presença de impulsos no fim da resposta ao impulso medida com a varredura logarítmica. Para que o alto-falante atuasse dentro de sua faixa linear seu nível foi diminuído. Além disso, o ganho dos quatro microfones foi ajustado para que o nível medido ficasse cerca de 3 dB abaixo do limite superior (quando o sinal é clipado) quando o sinal do alto-falante é máximo. Isso reduz o nível do ruído elétrico associado ao microfone. A diferença de fase entre os mics era na região abaixo de 100Hz e acima de 9000Hz. A relação sinal ruído (SNR) era de 50dB para aquelas condições de medição.

Posteriormente, um arranjo de microfones foi construído com materiais disponíveis no laboratório da FEM (Figura 17), sendo a distância entre cada um deles selecionada através da construção de arranjo não redundante (VERTATSCHITSCH; HAYKIN, 1986). Assim, garante-se que o arranjo é formado pela maior possibilidade de diferentes distâncias entre cada par de microfones (JABLONSKI, 1986). Desta forma, uma maior possibilidade de comprimentos de ondas podem ser privilegiados, enquanto que se a distância entre os microfones fosse constante apenas uma parcela dos comprimentos de onda, relativos a esta distância, seriam privilegiados. Um planta do esquema de medições é mostrada na Figura 18 para ilustrar melhor a situação da medição.

As medições foram feitas com o sinal de excitação sendo uma varredura exponencial com frequências de 60 a 16000 Hz. A Fig. 17 ilustra o aparato e as condições para as medições. Importante relatar que a câmara anecoica não podia ser considerada perfeitamente anecoica pois, uma parte do seu teto não estava recoberta com o material absorvente. Inclusive será possível notar nas figuras dos resultados das medições,



Figura 16 – Arranjo de microfones com distância coprimas (QIN *et al.*, 2015) usado nas medições

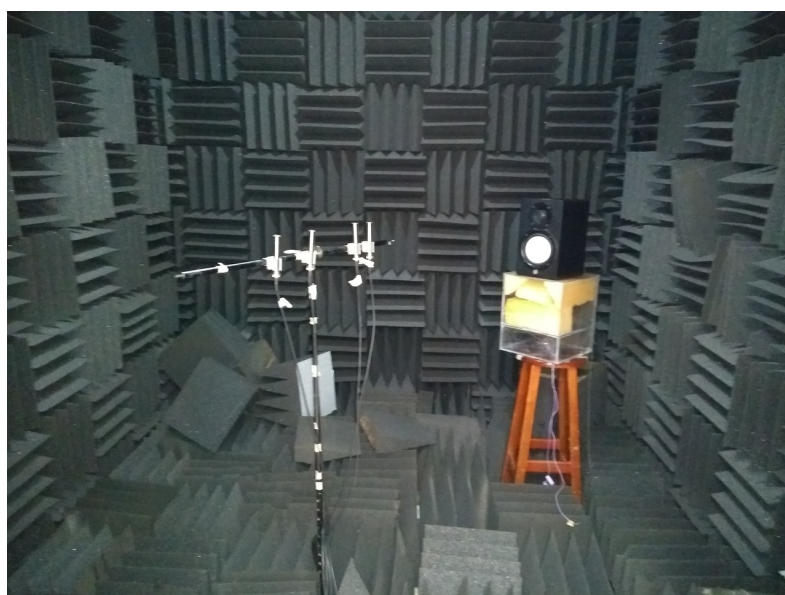


Figura 17 – Sistema de medição na câmara anecoica FEM. Arranjo de microfones com distância coprima (JABLONSKI, 1986) mais fonte

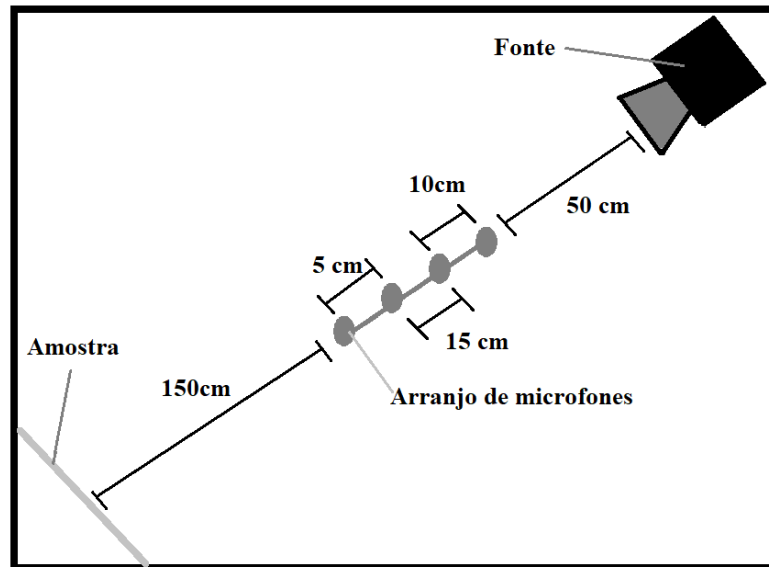


Figura 18 – Planta do sistema de medição na câmara anecoica FEM.

apresentadas na Seção 6.2, uma reflexão proveniente do teto. Apesar disto, foi possível desconsiderar essa interferência nas avaliações que foram feitas.

Finalmente, com as medições realizadas, os dados foram tratados em códigos semelhantes ao usados na elaboração do campo acústico “sintético”. Ou seja, ambos os métodos SLIM e RELAX foram usados na separação da onda incidente da refletida, permitindo o cálculo dos parâmetros desejados, como a impedância acústica de superfície da amostra. Apesar das semelhanças entre os códigos por se tratarem da mesma análise do problema, o código da medição precisava ser devidamente adaptado para o uso em um ambiente com características fixas, câmara anecoica.

6 Resultados

Nesse capítulo será mostrado os resultados dos processos indicados no Capítulo 4. De forma a melhor organizar-los, eles serão divididos em duas seções, a primeira abordando o campo acústico “sintético” e a segunda abordando as medições realizadas na câmara anecoica da FEM. Uma breve discussão sobre os respectivos resultados será feita em suas respectivas seções e no final desse capítulo uma discussão mais detalhada será feita. Por fim, os resultados experimentais são comparados com os resultados de outro trabalho (ZANONI, 2018), onde a impedância acústica foi medida através do tubo de impedâncias.

6.1 Resultados numéricos

Na Seção 4.1 o modelo utilizado para criação dos algoritmos, utilizando o Matlab, foi descrito, sendo esse modelo a base para os resultados dos códigos aqui mencionados. Além disso, a simulação do método de medição do material poroso realizada se mostrou coerente com os valores esperados dos parâmetros acústicos para uma determinada banda de frequência. Isso tornou possível que algumas medições fossem feitas com um arranjo não flexível de microfones, onde as posições de microfones são predefinidas. Dessa forma, o método proposto pode ser avaliado com um campo acústico sintético cujos parâmetros são previamente conhecidos, permitindo uma avaliação do seu desempenho.

6.1.1 Simulação com material poroso - Melamina

Para validar o ambiente acústico sintético gerado era necessário uma referência para comparação. Assim, foram utilizados os parâmetros para melamina encontrados em Brandão (2016). Usando-se o modelo descrito na 4.1.1, é possível determinar a pressão total (incidente mais refletida) para um determinado ponto no espaço. Assim, torna-se possível determinar qual seria a pressão medida por um arranjo de microfones (4 pontos distintos no espaço), dado que existe nesse ambiente somente uma fonte e um material poroso, sendo o material poroso a razão de existir uma reflexão da onda sonora no ambiente. A Figura 19 ilustra os resultados obtidos para a impedância característica, impedância de superfície e o coeficiente de absorção da melamina, respectivamente. Importante ressaltar que os resultados foram compatíveis com os valores encontrados em Brandão (2016), afirmando a coesão no código elaborado.

Para a simulação geramos o campo acústico incidente sobre o arranjo através da

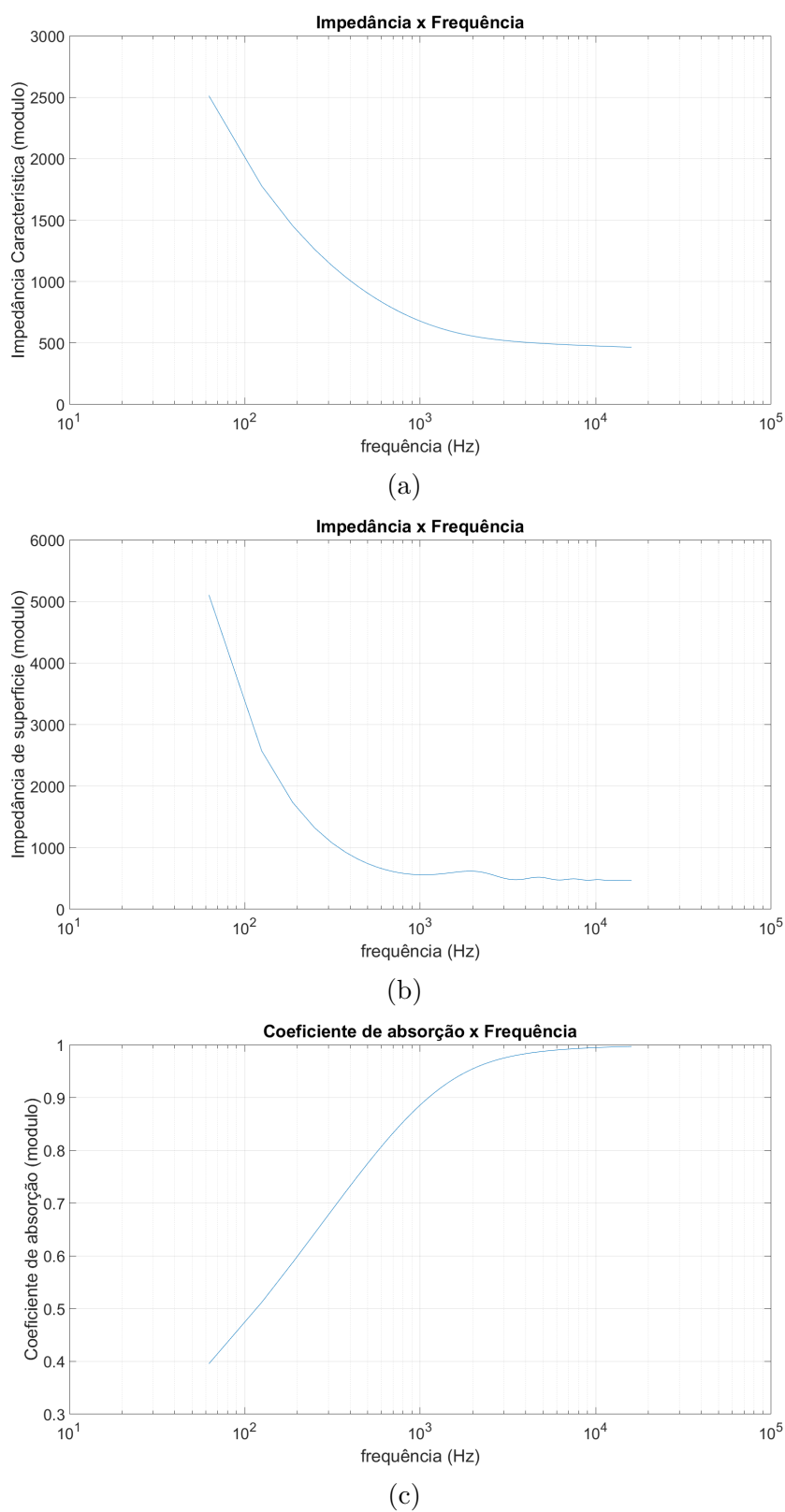


Figura 19 – Impedância característica (a), impedância de superfície (b) e coeficiente de absorção (c) da melamina, simulado de acordo com o modelo de Allard e Champoux (1992).

equação (4.3), que descreve a pressão total (incidente mais refletida) para um determinado ponto no espaço, assumindo que que existe nesse ambiente somente uma fonte e uma amostra, sendo a amostra a razão de existir uma reflexão da onda sonora no ambiente. A simulação de um arranjo com 4 microfones é feita calculando-se a pressão em quatro pontos distintos do espaço. Importante ressaltar que o motivo do arranjo ter 4 microfones, no algoritmo, foi para deixa-lo compatível com o processo realizado nas medições na câmara anecoica da FEM, onde foi usado um arranjo com 4 microfones. A resposta temporal obtida para uma amostra de melamina é exemplificada na Figura 20. Os parâmetros usados para a simulação usando uma amostra de melamina e para os valores téóricos comparativos com os resultados experimentais podem ser encontrados em Brandão (2016) e são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros para melamina

Grandeza física	Valor
Porosidade [Ns/m^4]	0,99
Resistividade de fluxo	$25e^3$
Tortuosidade	1
Comprimento viscoso característico	$160e^{-6}$
Espessura [m]	$5e^{-2}$

Após ter gerado o campo sonoro resultante, os métodos esparsos SLIM(XU *et al.*, 2013) e RELAX (WANG *et al.*, 2004a) foram utilizados para separar as componentes incidentes e refletidas do campo sonoro. Foi possível verificar que o SLIM conseguiu identificar adequadamente a posição das duas fontes geradas, como mostra a Figura 21, com a fonte real em 180° e a fonte imagem em 0° . Além disto, o algoritmo RELAX conseguiu recuperar a forma de onda do sinal original praticamente sem distorções, como exemplificado na Figura 22.

A Figura 20 mostra os sinais de cada um dos 4 microfones, obtidos pelo modelo da Equação (4.3) para a reflexão causada por um material com as características da melamina. Estes quatro sinais são fornecidos ao algoritmo SLIM que determina a quantidade (duas) e direção de chegada (0° e 180°) dos sinais que constituem o campo acústico em questão. Estes resultados são exemplificados na Figura 21, que apresenta maior emissão de energia sonora em 0° e 180° , ou seja, as fontes sonoras se encontram nessas posições. Os mesmos quatro sinais mais a informação de direção da fonte definida pelo algoritmo SLIM são então usados pelo algoritmo RELAX para construir um único sinal incidente e um único sinal refletido como se houvesse um microfone superdirecional na posição central do arranjo. Os sinais observados na Figura 22, são idênticos, a menos de deslocamento, dos sinais que compõem a Figura 20. Os resultados dos parâmetros acústicos da “medição simulada” a partir do campo acústico sintético com uma amostra de porosa de melamina são apresentados na Figura 23 .

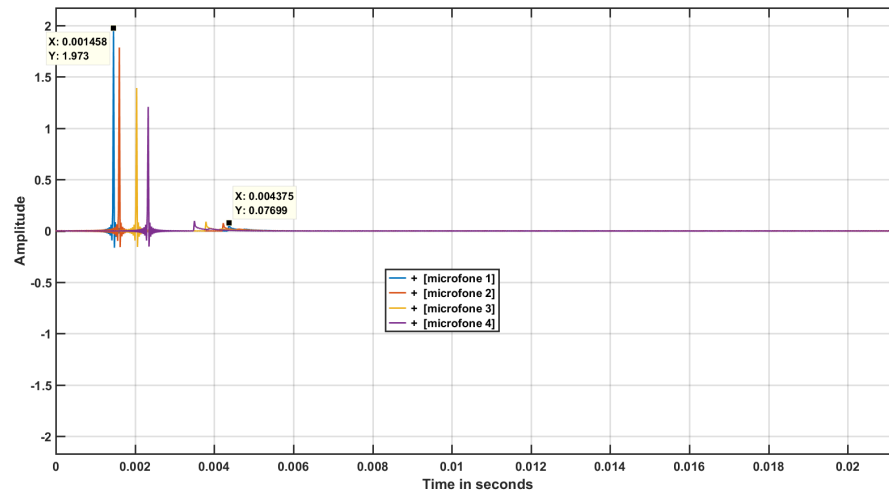


Figura 20 – São apresentados 4 sinais, um para cada posição de microfone, obtidos pelo modelo da Equação (4.3) para a reflexão causada por um material com as características da melamina.

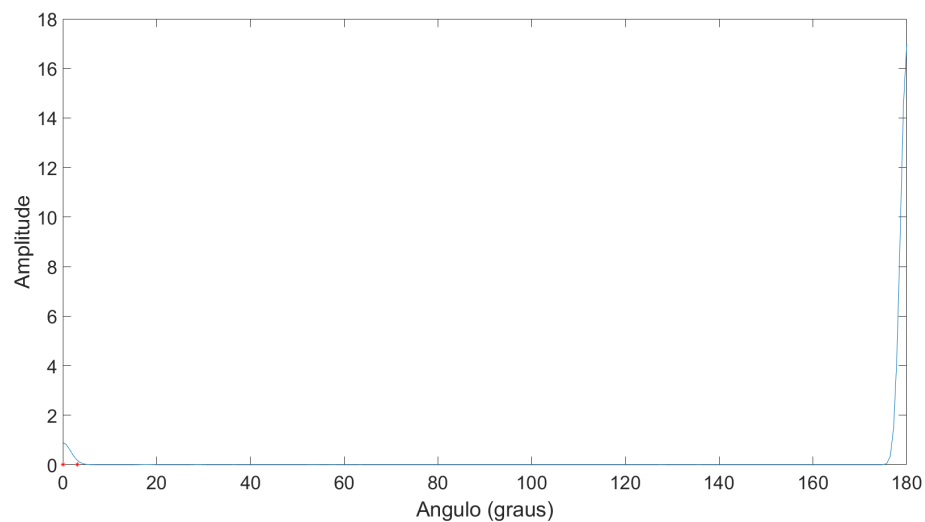


Figura 21 – Aplicação do SLIM (XU *et al.*, 2013) no campo acústico “sintético” em um ambiente com material poroso (melamina), para encontrar a posição das fontes de onda sonora.

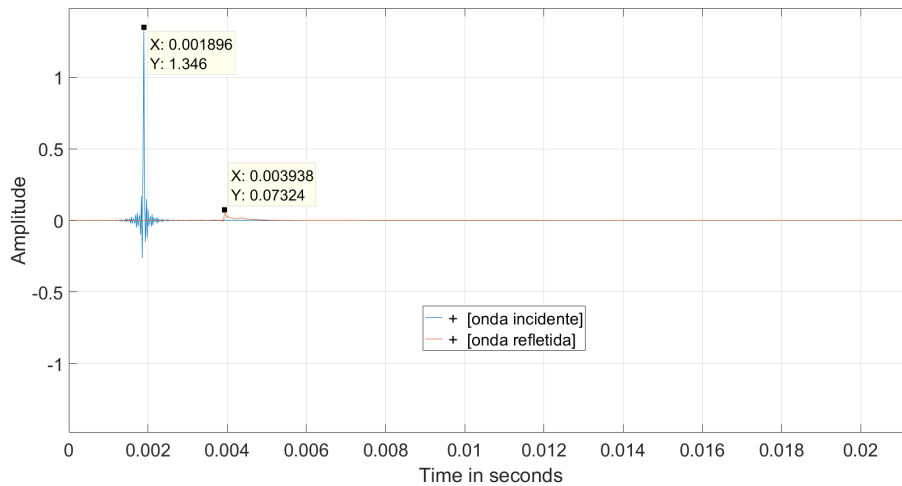


Figura 22 – Aplicação do RELAX (WANG *et al.*, 2004a) no campo acústico “sintético” em um ambiente com material poroso (melamina), para recuperar a energia sonora sem distorções.

6.1.2 Simulação com material poroso - Lãs minerais

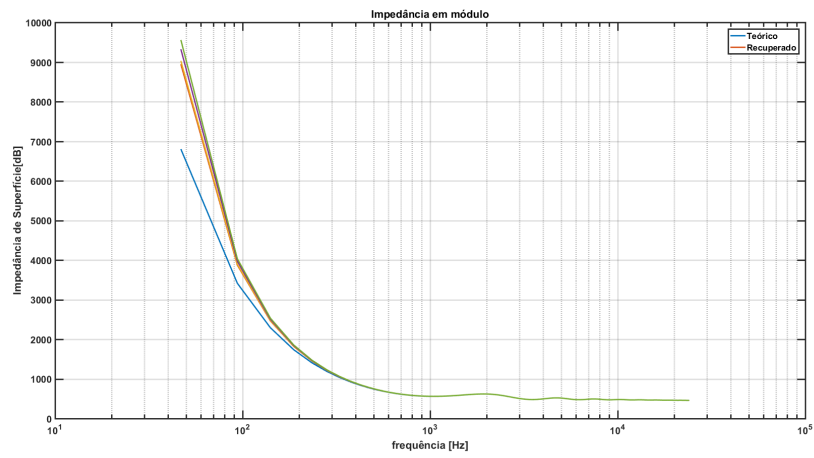
Como pode ser observado na Seção 6.1.1, os resultados encontrados foram promissores. Tanto na elaboração do ambiente acústico quanto na confirmação da funcionalidade dos métodos esparsos (SLIM e RELAX). Assim, os próximos passos se tornam viáveis, i.e., realizar medições em um ambiente real utilizando o método proposto para estimação das propriedades acústicas dos materiais.

Porém, para uma melhor verificação dos resultados das medições em um ambiente real (apresentados na Seção 6.2), foram realizadas estimativas dos valores esperados das impedâncias de superfícies dos materiais a serem medidos: lã de rocha e lã de vidro. As simulações para estes materiais seguem o mesmo modelo usado previamente para a melamina.

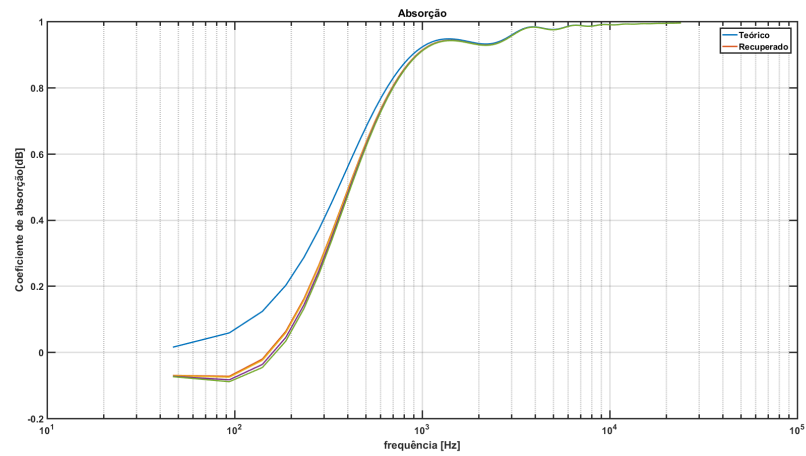
Os parâmetros usados para a simulação usando uma amostra de lã de rocha e para os valores teóricos que serão comparados com os resultados experimentais podem ser encontrados em Kino e Ueno (2008) e são descritos na Tabela 3

Tabela 3 – Parâmetros para lã de rocha

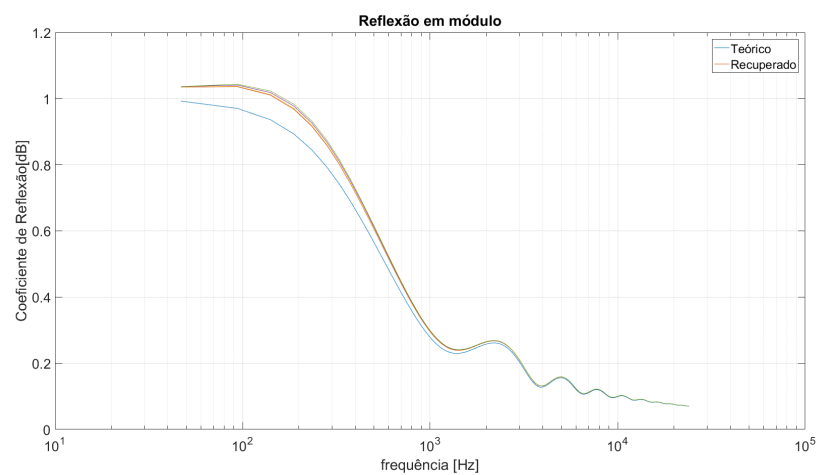
Grandeza física	Valor
Porosidade $[Ns/m^4]$	0,94
Resistividade de fluxo	$135e^3$
Tortuosidade	2,1
Comprimento viscoso característico	$49e^{-6}$
Espessura $[m]$	$5e^{-2}$



(a)



(b)



(c)

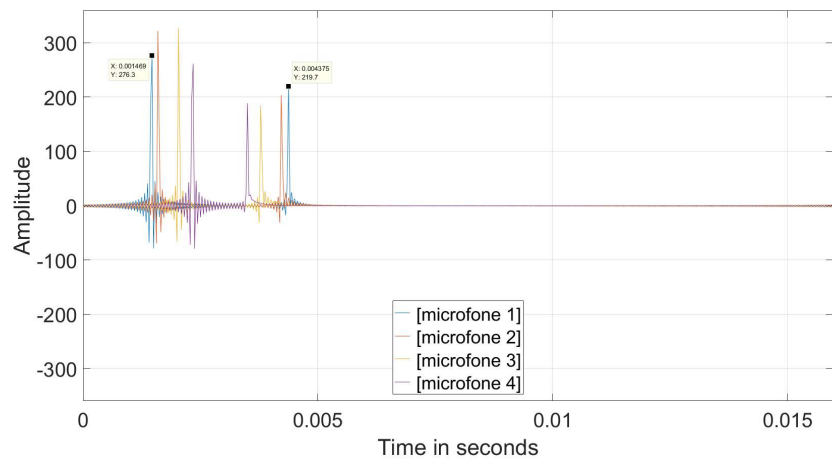
Figura 23 – Comparação dos valores teóricos dos parâmetros acústicos e dos valores simulados para uma medição com quatro microfones a partir do campo acústico sintético com uma amostra de melamina.

Os parâmetros usados para a lã de vidro também foram retirados de Kino e Ueno (2008) e descritos na Tabela 4

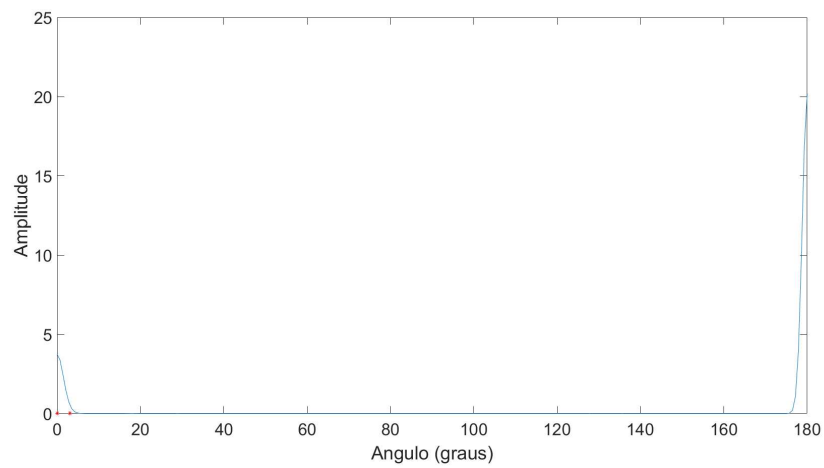
Tabela 4 – Parâmetros para lã de vidro

Grandeza física	Valor
Porosidade $[Ns/m^4]$	0,99
Resistividade de fluxo	$9e^3$
Tortuosidade	1
Comprimento viscoso característico	$192e^{-6}$
Espessura $[m]$	$5e^{-2}$

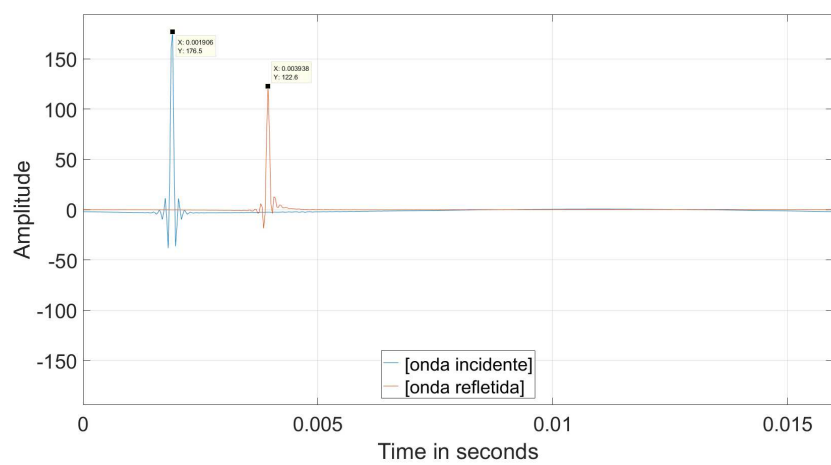
A simulação numérica do campo acústico sintético e sua recuperação com os métodos SLIM e RELAX para a lã de rocha são encontrados na Figura 24 e para a lã de vidro na Figura 26. Os resultados dos parâmetros acústicos da “medição simulada” a partir do campo acústico sintético com uma amostra de porosa de lã de rocha são apresentados na Figura 25 e os da lã de vidro na Figura 27.



(a)

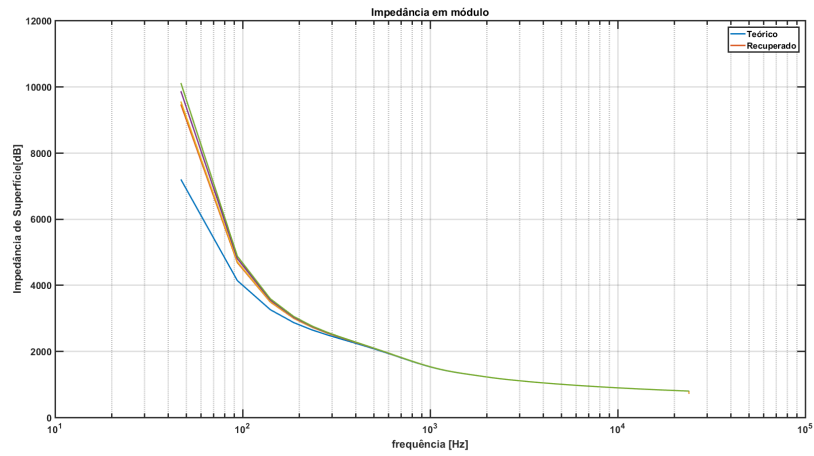


(b)

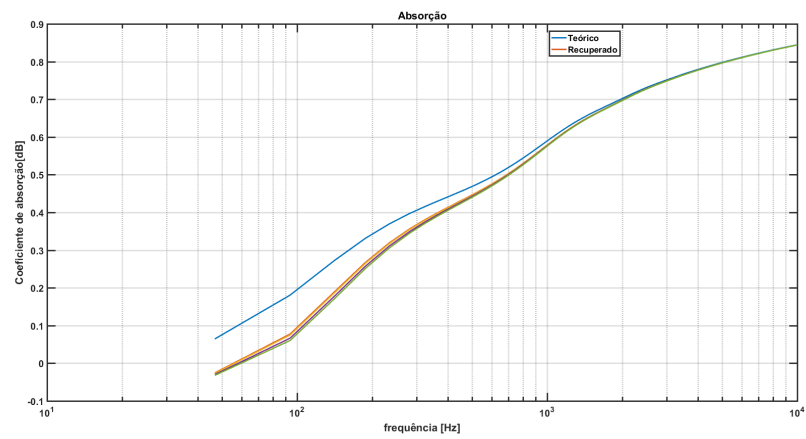


(c)

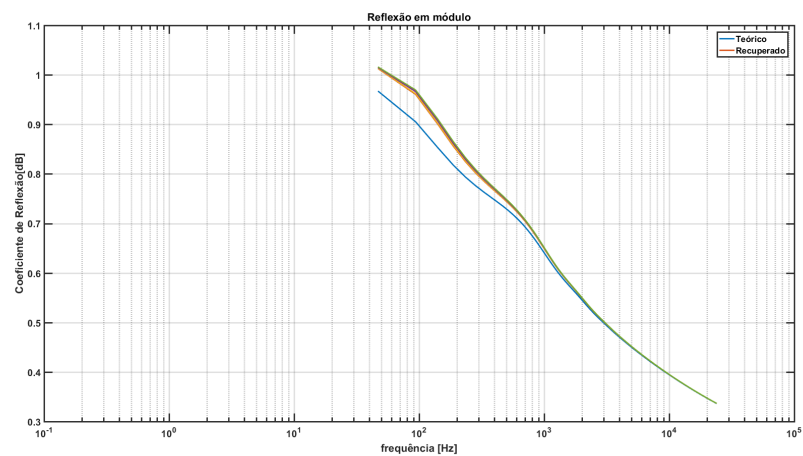
Figura 24 – Simulação numérica do campo acústico sintético e sua recuperação pelos métodos SLIM e RELAX para uma amostra de lã de rocha.



(a)

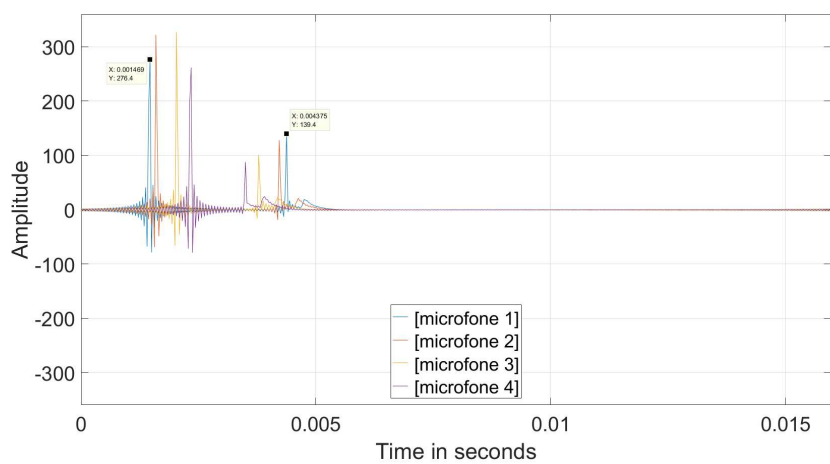


(b)

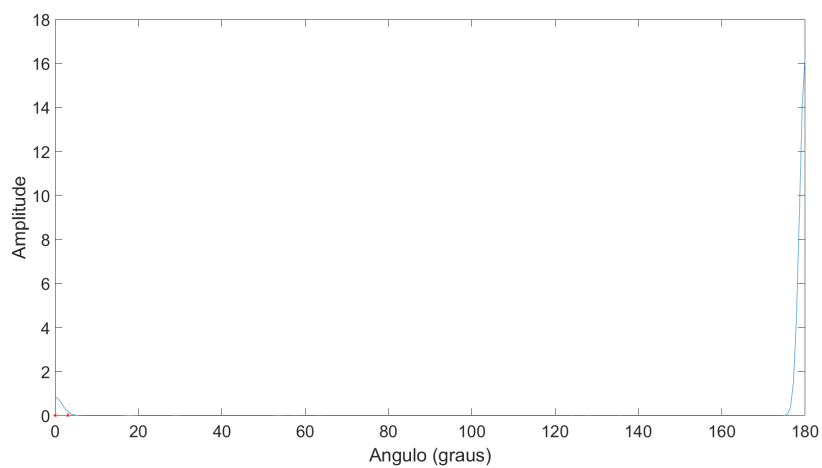


(c)

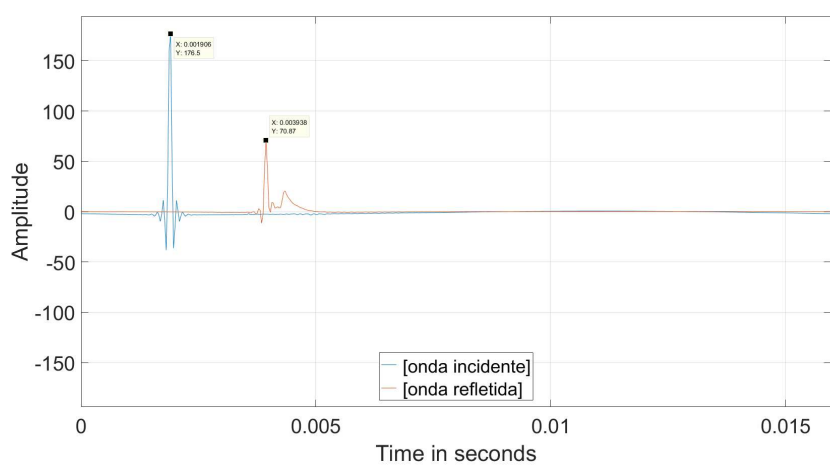
Figura 25 – Comparação dos valores téóricos dos parâmetros acústicos e dos valores simulados para uma medição com quatro microfones a partir do campo acústico sintético com uma amostra de lã de rocha.



(a)

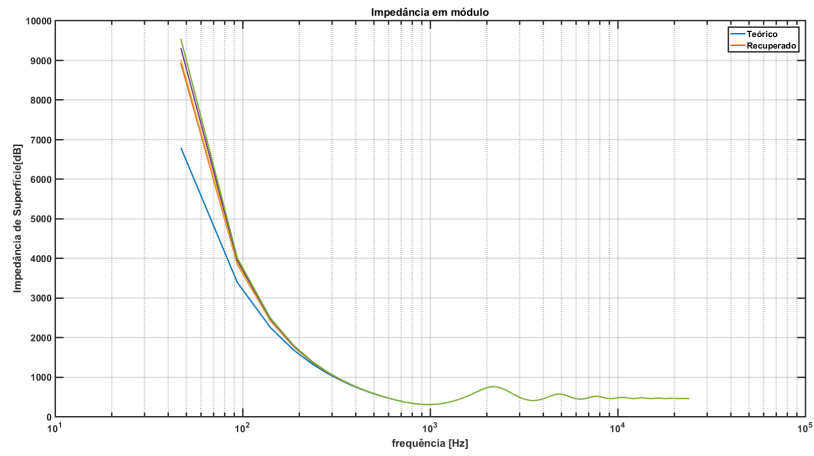


(b)

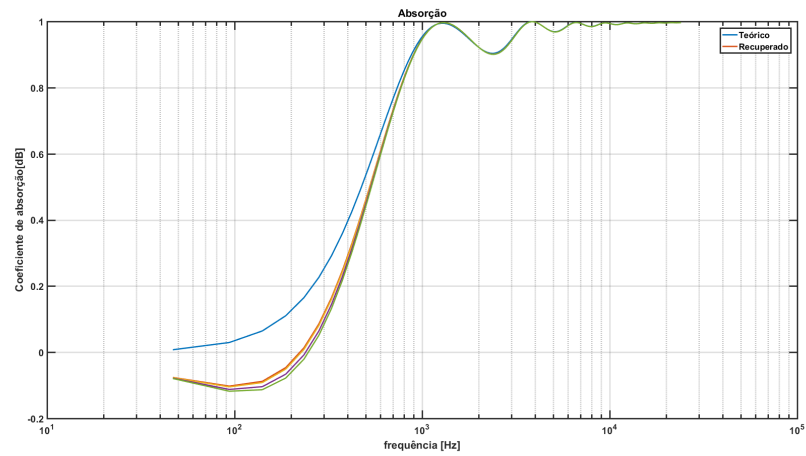


(c)

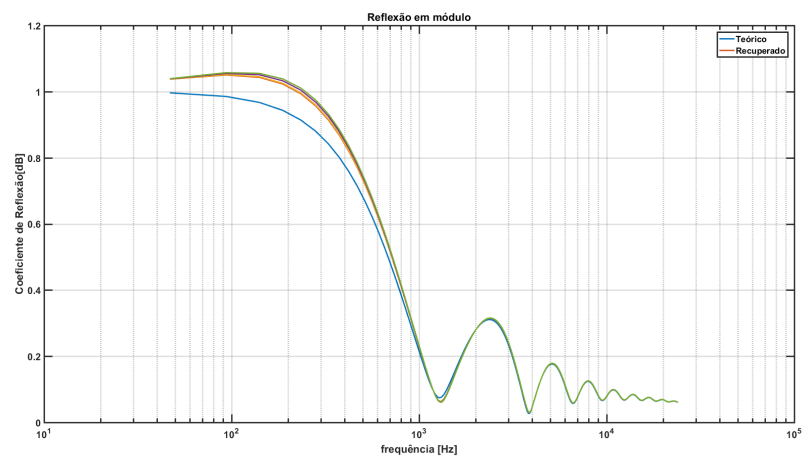
Figura 26 – Simulação numérica do campo acústico sintético e sua recuperação pelos métodos SLIM e RELAX para uma amostra de lã de vidro.



(a)



(b)



(c)

Figura 27 – Comparação dos valores teóricos dos parâmetros acústicos e dos valores simulados para uma medição com quatro microfones a partir do campo acústico sintético com uma amostra de lã de vidro.

6.1.3 Discussão

As figuras mostradas na seção anterior mostram o comportamento do algoritmo que gera o campo acústico (Figura 20) a ser estudado, algoritmo esparsos (SLIM Figura(21) e RELAX Figura(22)), e os resultados das propriedades acústicas Figura (19b) e Figura (19b). O campo acústico possui um comportamento bem próximo do esperado, que seriam dois impulsos, um da onda incidente e o outro da onda refletida. O SLIM se mostrou eficiente em separar os dois pontos de interesse, o que juntamente com o RELAX tornou possível recuperar o sinal gerado. Nas figuras dos cálculos das propriedades acústicas são mostradas cinco curvas diferentes. Quatro representam os valores calculados pelos quatro microfones que compõem o arranjo de microfones, e a outra curva ao valor teórico esperado da respectiva característica acústica. Dessa comparação é notável que os resultados não são razoáveis para as frequências abaixo de 1000Hz, porém para os valores superiores as curvas estão bem próximas.

6.2 Resultados experimentais

Como foi mencionado na seção 5.1, primeiramente foi feita uma medição com os quatro microfones, como ilustrado na Figura 15, averiguando possíveis diferenças na sensibilidade de cada um deles. A diferença de fase entre os mics era maior na região abaixo de 100 Hz e acima de 9 kHz, isso é apresentado na Figura 28. Nota-se da comparação entre os microfones, que eles só apresentavam diferenças significativas na sensibilidade para valores acima de 9 kHz, que está já no limite superior da nossa faixa de interesse, que vai até a banda de oitava de 8 kHz, assim não foi necessário realizar uma calibração. Ambas as amostras usadas possuíam dimensões semelhantes com comprimento de 150[cm], largura de 50[cm] e altura de 20[cm].

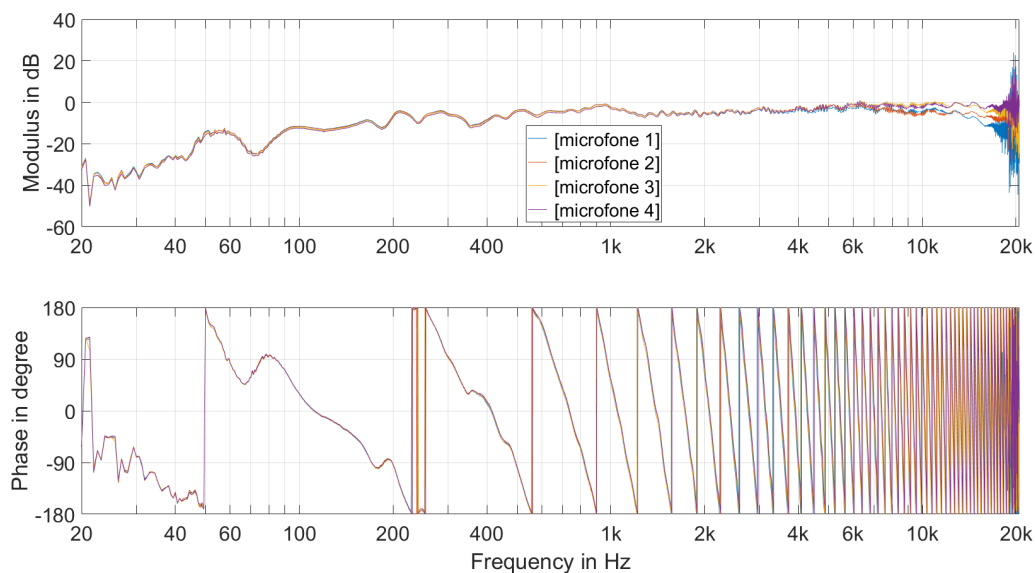


Figura 28 – Diferença de amplitude e fase nos microfones.

De forma a testar a confiabilidade dos algoritmos esparsos na localização dessas duas “fontes”, medições foram realizadas girando o arranjo de 0° até 180° no passo de 30° . Esses resultados são representados na Figura 29. Estas figuras mostram que o algoritmo esparsa (SLIM) foi capaz de determinar a direção da fonte em todos os casos. Os ângulos calculados pelo algoritmo foram, em geral, bastante próximos aos valores medidos com transferidor diretamente na estrutura, com exceção da direção de 0° , que apresentou um desvio de 15° . Este desvio diminuiu consideravelmente para os dados subsequentes.

Na Seção 6.1.2 foram simulados os valores da impedância de superfície e do coeficiente de absorção que podem ser esperados nas medições das lâs de rocha e vidro. Estes valores são médias esperadas para a impedância de superfície desses materiais. Esses materiais porosos possuem um grande uso na construção de ambientes acústicos, fazendo com que uma boa caracterização deles seja sempre interessante (ZANONI, 2018). Assim, esses materiais foram simulados para que fosse possível ter uma comparação com

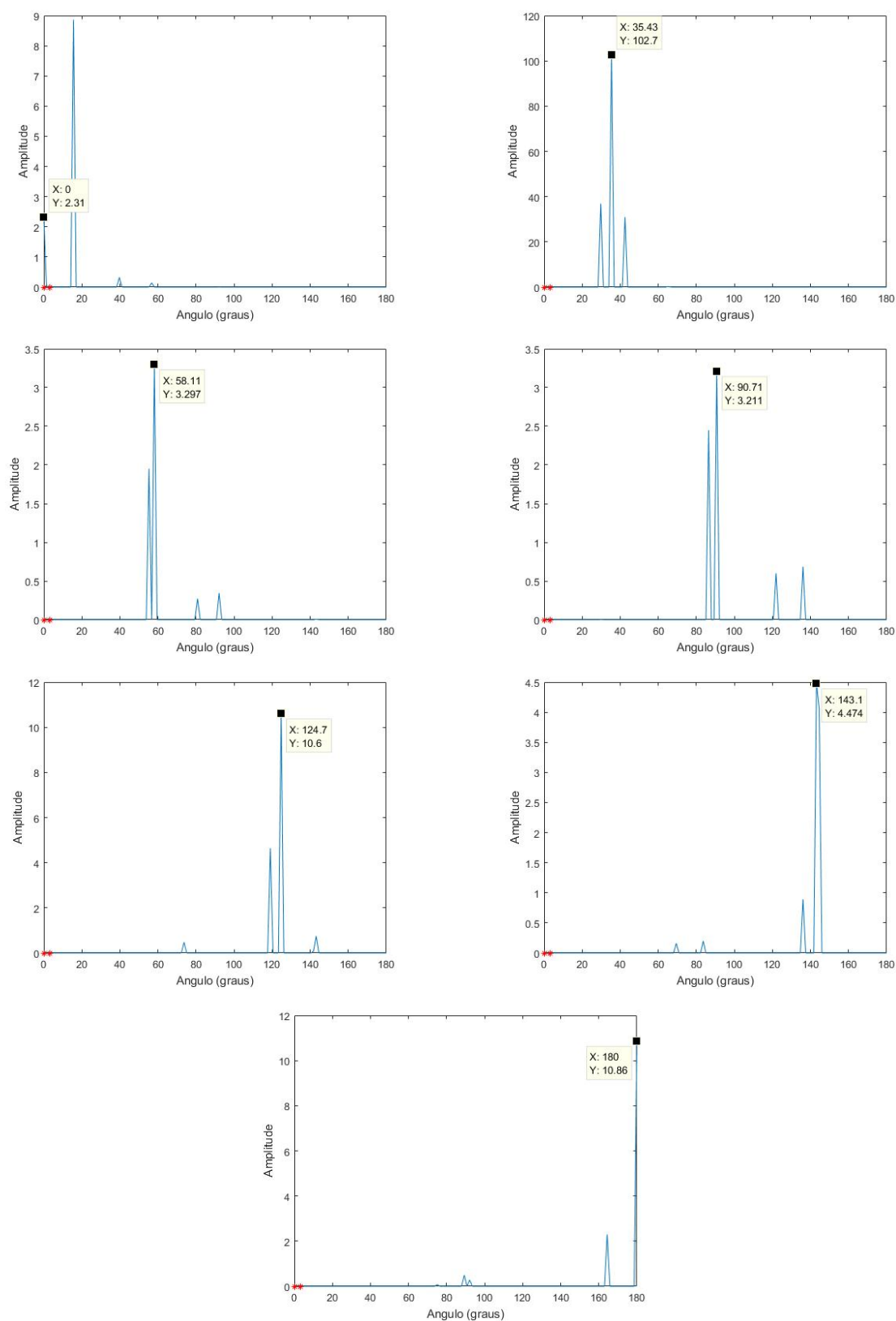


Figura 29 – Gráfico da Amplitude x Posição angular extraída com o algoritmo SLIM, para amostra posicionada em 0° (superior esquerda), 30° (superior direita), e assim por diante até 180° (inferior) em relação ao arranjo.

os valores medidos. Por fim, foi realizado um caso extremo de medição, onde a medição de um material rígido (madeira) foi feita para verificar o desempenho do algoritmo, cujo resultado esperado é mais previsível. Assim, para manter um nível organizacional iremos dividir esses resultados em três diferentes subseções.

Existe extrema importância em ressaltar que a câmara anecoica da FEM não estava totalmente recoberta com o material absorvedor no teto, acarretando uma reflexão extra em todos os sinais amostrados. Porém, como a distância fonte-amostra-arranjo era suficientemente menor que a distância fonte-teto-arranjo, a componente refletida pelo teto não se superpunha à componente refletida pela amostra, fazendo com que não existisse interferência nas informações desejadas. Mas isso vai explicar a “segunda reflexão” que será encontrada nas figuras que irão mostrar a pressão sonora dentro da câmara.

6.2.1 Medição de material rígido - Madeira

Para uma primeira tentativa nesse ambiente foi escolhido um material cujo resultado esperado fosse mais previsível. Dessa forma, realizado com um material rígido (madeira). Assim, seria esperado que a reflexão da onda acontecesse de forma quase que total.

A pressão sonora medida na câmara anecoica da FEM é apresentada na Figura 30. Com o uso dos algoritmos SLIM e RELAX o sinal no tempo é recuperado, observado na Figura 31. Importante ressaltar que o SLIM identifica a posição das duas fontes (incidente e refletida). Porém, como já foi mencionado em Xu *et al.* (2013), o algoritmo SLIM tende a distorcer a informação da amplitude de energia. Para evitar esta distorção, é necessário recuperar essa informação com outro algoritmo, e.g. RELAX (WANG *et al.*, 2004a). Essa observação também será válida para as próximas análises de medições. Por fim, não foram calculados parâmetros acústicos para esse caso. Dado que a principal motivação desse teste era verificar o comportamento dos algoritmos SLIM e RELAX para esse caso extremo de um material rígido. Além de que os parâmetros necessários para o cálculo teórico dos parâmetros acústicos não eram conhecidos.

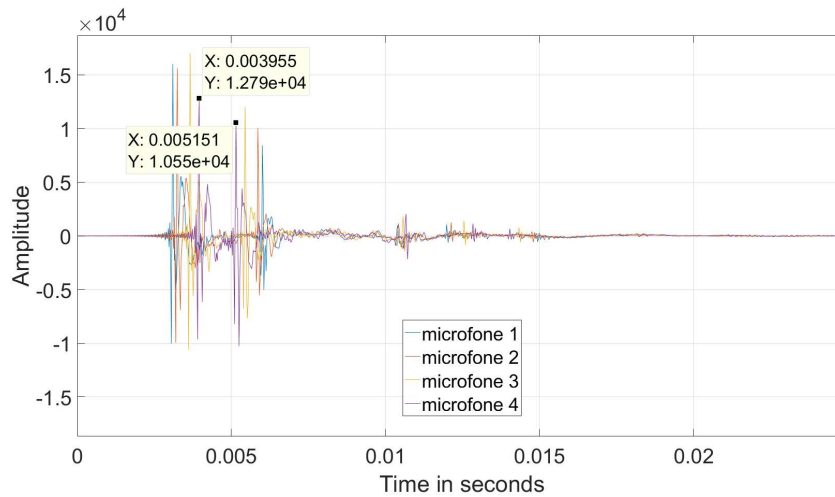


Figura 30 – Pressão sonora medida na câmara anecoica da FEM para madeira.

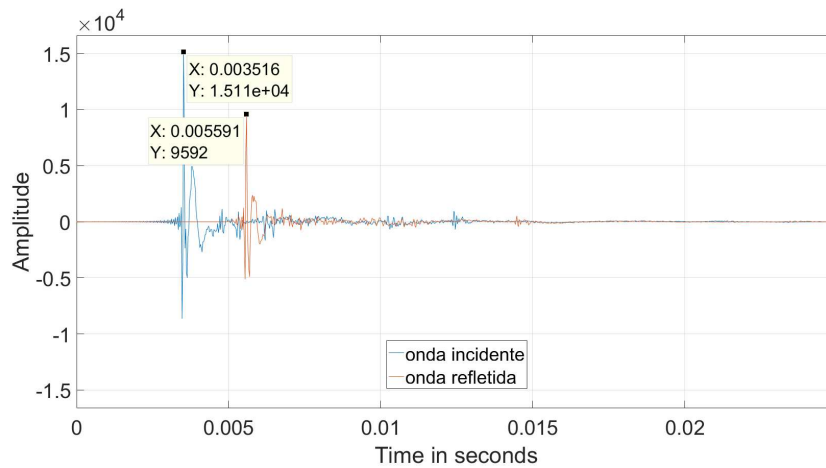
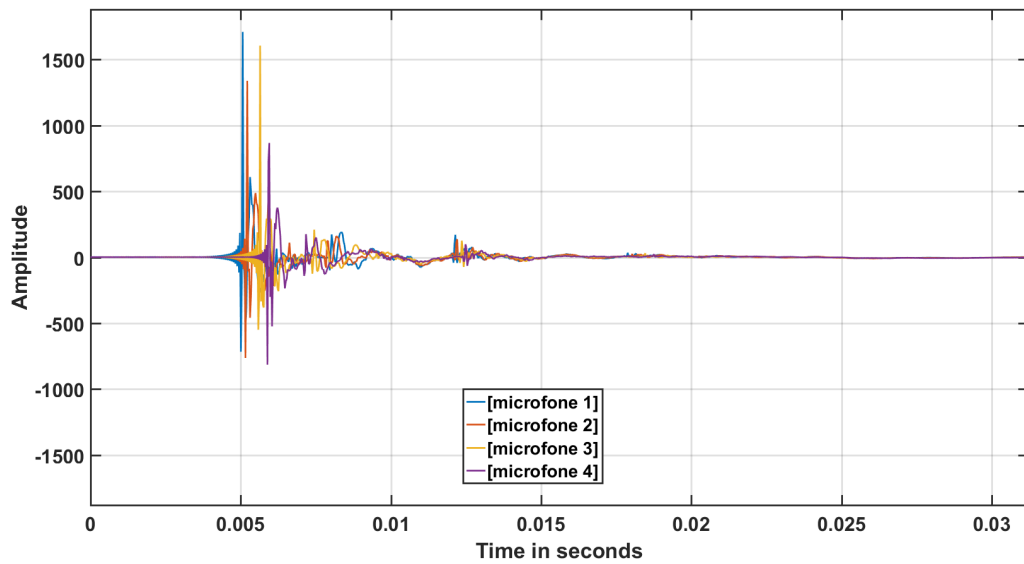


Figura 31 – Aplicação do RELAX no campo acústico na câmara anecoica da FEM, em um ambiente com material rígido (madeira), para recuperar a energia sonora.

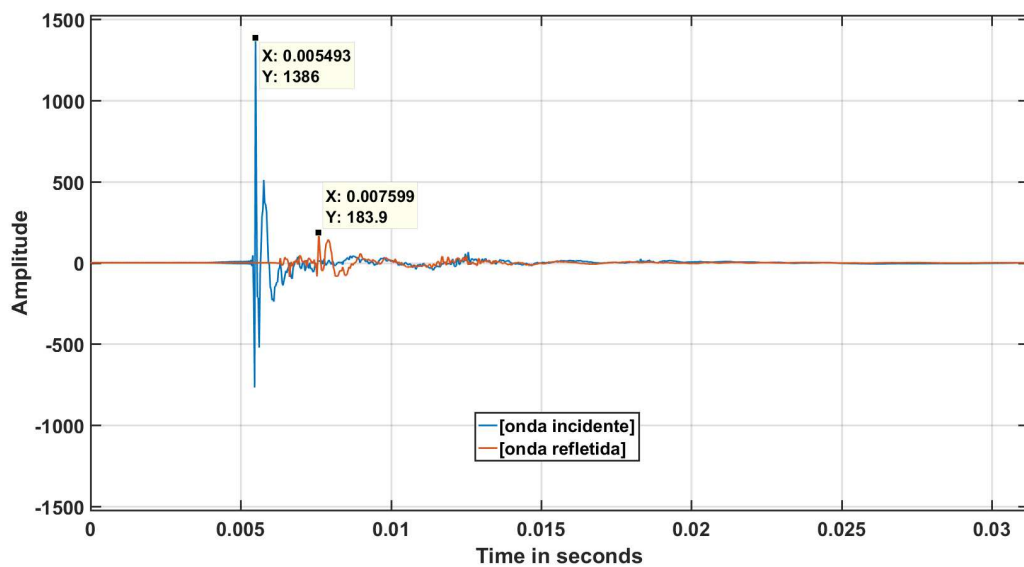
6.2.2 Medição material poroso - Lã de rocha

O primeiro teste com um material poroso foi realizado com a lã de rocha. Como o material em estudo não é rígido, espera-se que a parcela refletida da onda possua amplitude consideravelmente menor do que a onda incidente.

A pressão sonora medida na câmara anecoica da FEM é apresentada na Figura 32a. A recuperação do sinal no tempo pelos algoritmos SLIM e RELAX é dada na Figura 32b. Para esse sinal recuperado foram estimados os valores da impedância de superfície e coeficiente de absorção, ambos encontrados na Figura 33.



(a)



(b)

Figura 32 – Medição do sinal do tempo e sua recuperação com SLIM e RELAX para uma amostra de lã de rocha medida na câmara anecoica da FEM.

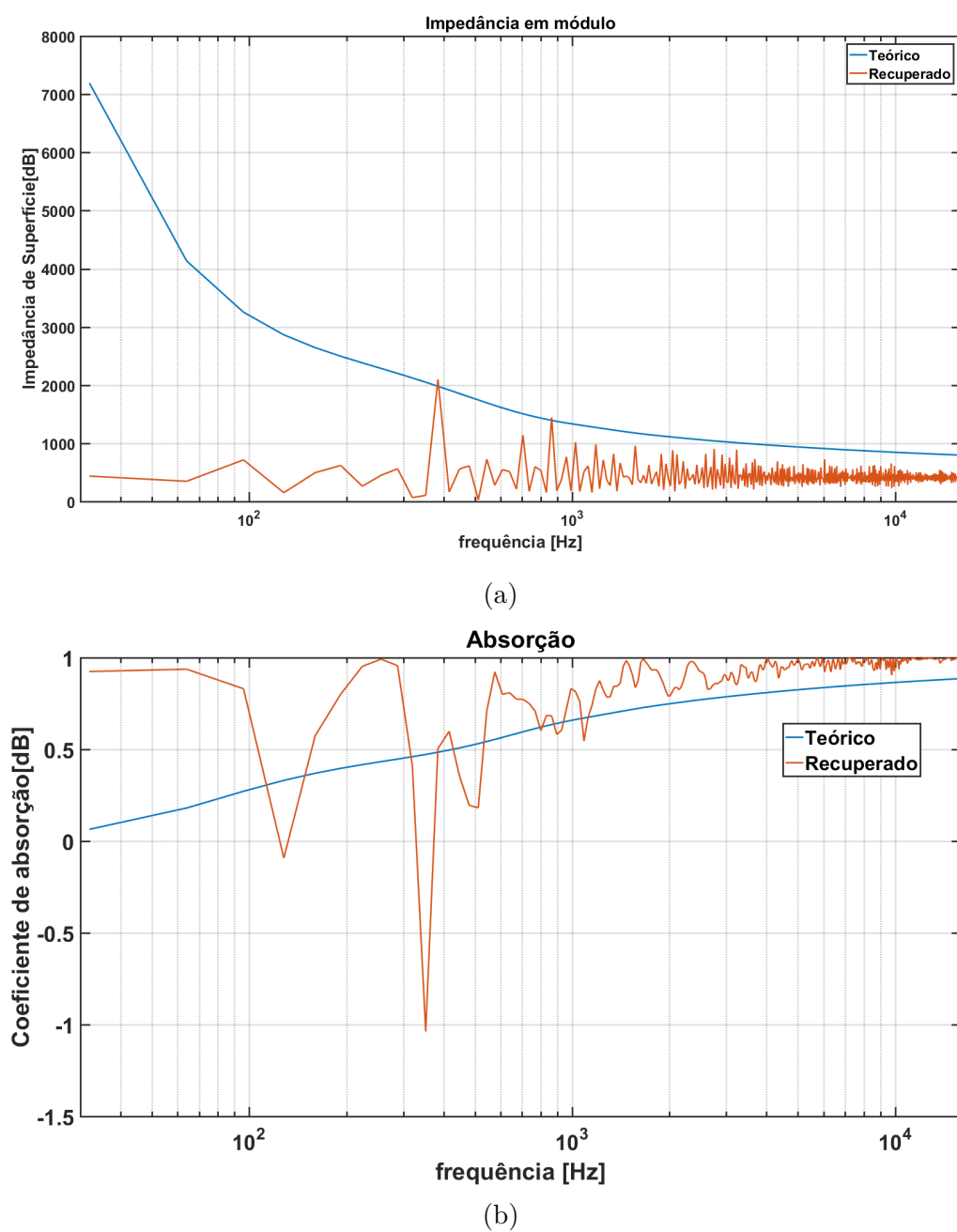
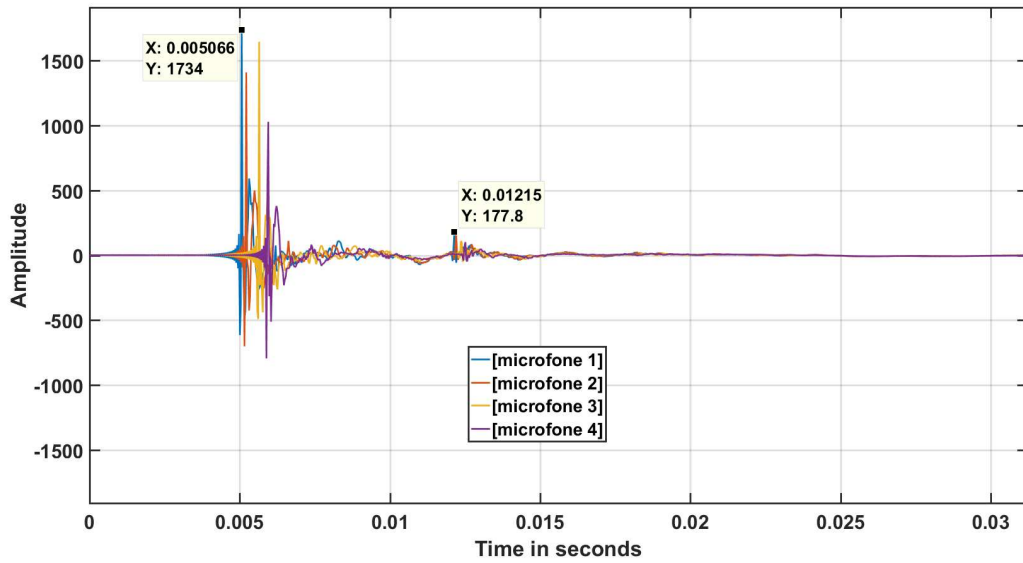


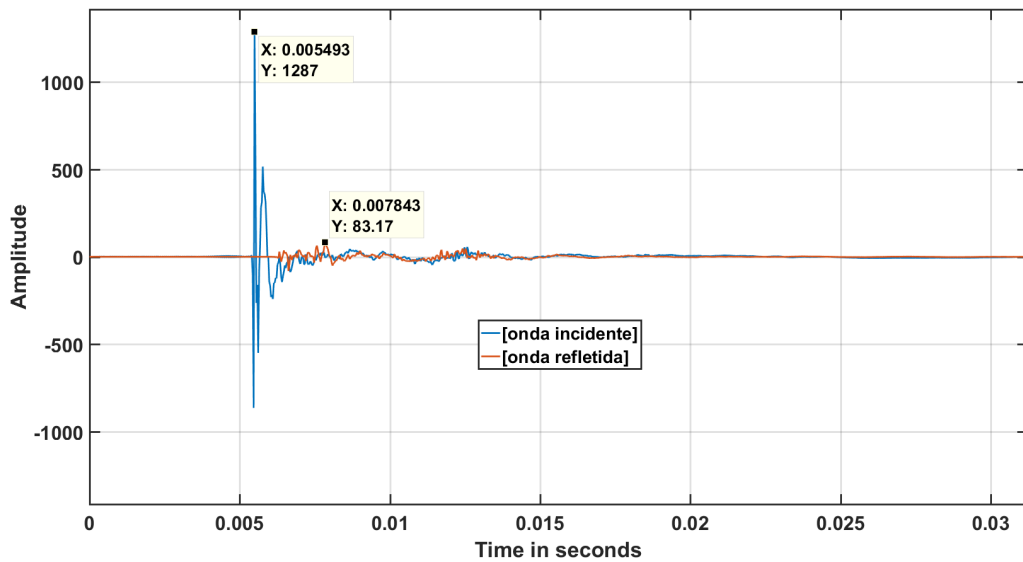
Figura 33 – Comparação dos valores teóricos dos parâmetros acústicos e dos valores medidos na câmara anecoica da FEM da lã de rocha com quatro microfones.

6.2.3 Medição material poroso - Lã de vidro

Os mesmos processos apresentados para a lã de rocha foram feitos para a lã de vidro. Dessa forma, a pressão sonora medida é mostrada na Figura 34a, a Figura 34b mostra a recuperação do sinal no tempo com o SLIM e RELAX, a estimação da impedância de superfície é mostrado na Figura 35a e a estimação do coeficiente de absorção é mostrado na Figura 35b.

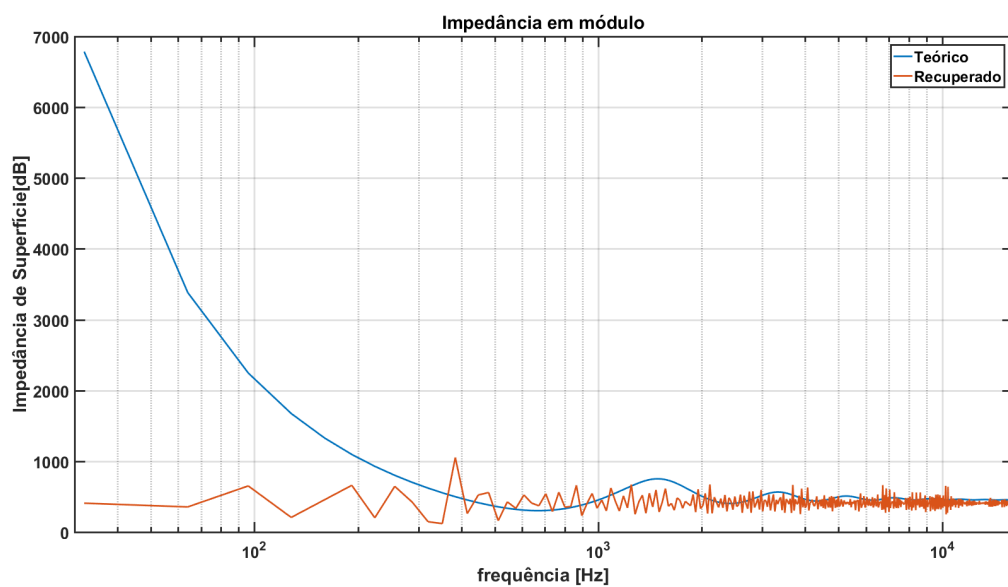


(a)

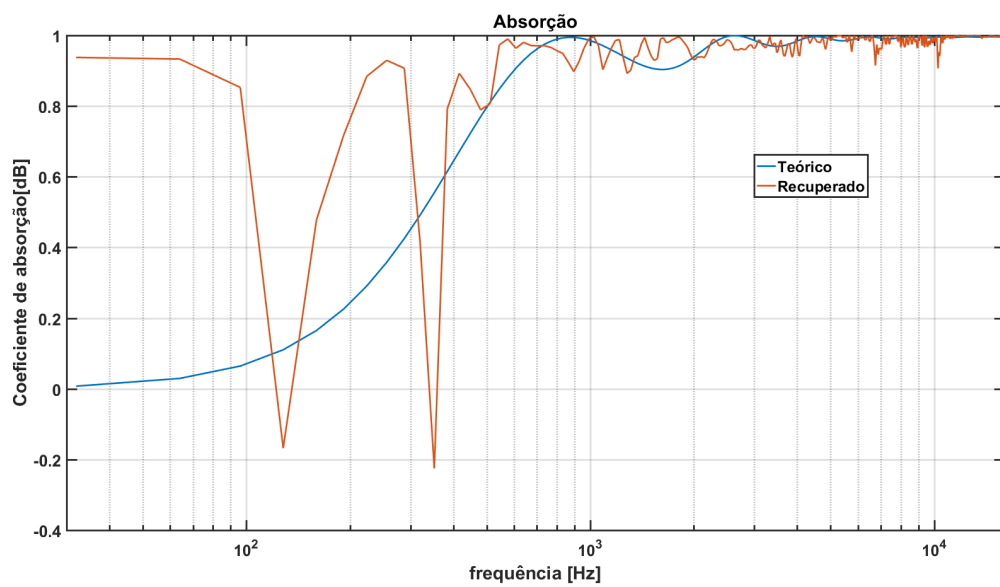


(b)

Figura 34 – Medição do sinal do tempo e sua recuperação com SLIM e RELAX para uma amostra de lã de vidro medida na câmara anecoica da FEM.



(a)

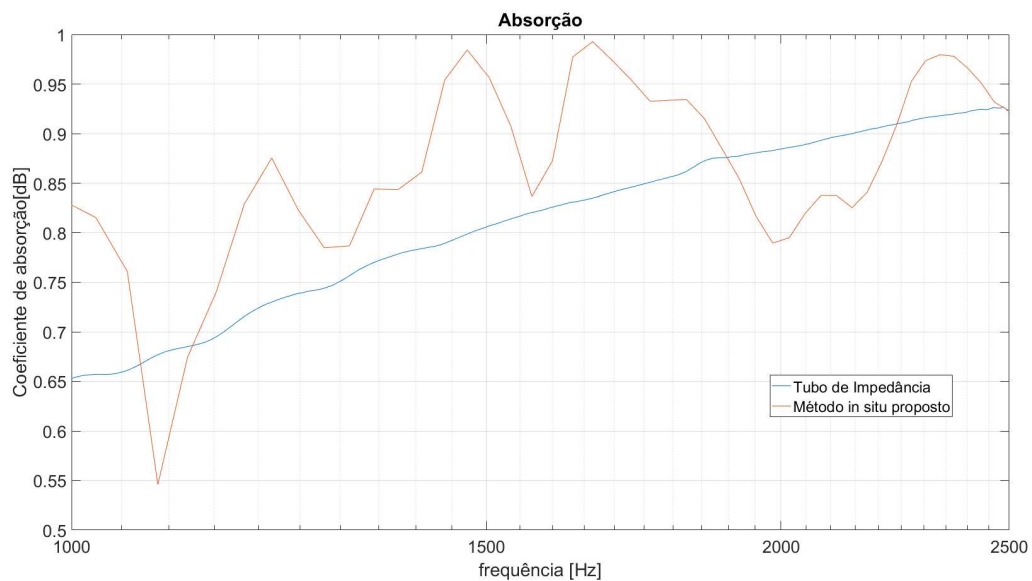


(b)

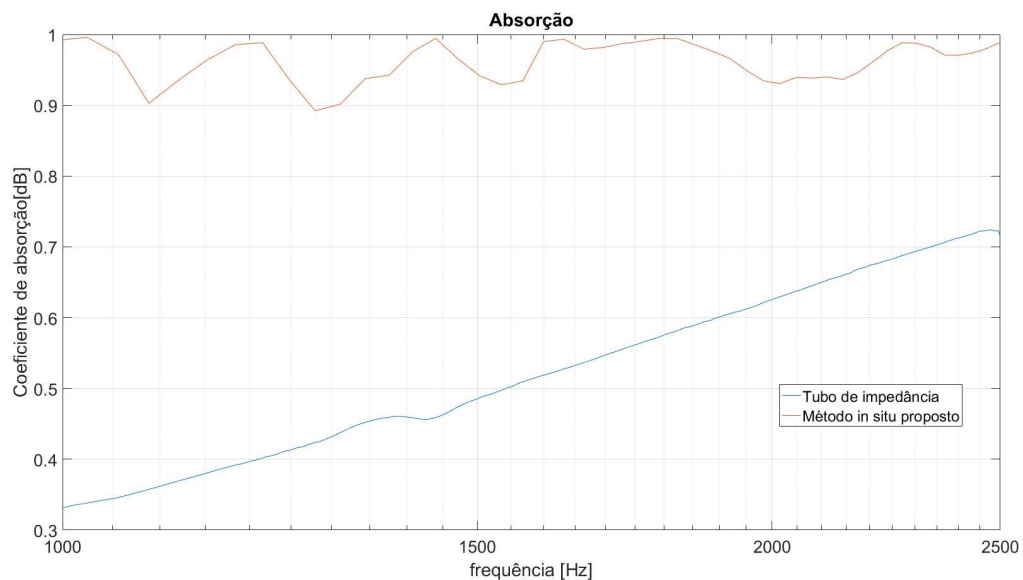
Figura 35 – Comparação dos valores teóricos dos parâmetros acústicos e dos valores medidos na câmara anecoica da FEM da lã de vidro com quatro microfones.

6.2.4 Comparação com tubo de impedâncias

No trabalho realizado por Zanoni (2018) foi estimado o coeficiente de absorção das mesmas amostras de lã de rocha e lã de vidro que as utilizadas nesse trabalho. Os dois resultados são comparados nas Figuras 36a e 36b. Importante ressaltar que as medições feitas no tubo de impedâncias foram limitadas para regiões entre 125Hz e 2500Hz. Como os resultados do método proposto não são razoáveis abaixo de 1000 Hz, a comparação entre ambos os métodos será feita somente na banda de 1000Hz até 2500 Hz



(a) Lã de Rocha



(b) Lã de vidro

Figura 36 – Comparação dos coeficientes de absorção para a medição em tubo de impedâncias (ZANONI, 2018) e na câmara anecoica da FEM.

6.2.5 Discussão

Os dois principais pontos a serem analisados dos resultados são: o comportamento dos algoritmos esparsos (SLIM e RELAX) e os valores encontrados para as propriedades acústicas. Como pode ser observado na Figura 34b que mostra a recuperação do sinal medido pelos algoritmos esparsos, o sinal foi recuperado de forma adequada, mostrando dois principais impulsos (onda incidente e onda refletida). As quatro diferentes curvas são dos valores da pressão medida por cada um dos microfones. Como era de se esperar da análise dos resultados numéricos, o erro na região abaixo de 1000Hz persiste nos resultados experimentais. Nas regiões acima de 1000Hz os resultados medidos se aproximam dos valores teóricos esperados. Da comparação dos resultados medidos na câmara anecoica e dos medidos no tubo de impedância é verificado que os valores para a lã de rocha não são aceitáveis e que os da lã de vidro apresentam similaridade, ou seja, apesar de não serem iguais possuem valores próximos.

6.3 Discussão geral

Observando as Figuras que comparam os resultados obtidos tanto da simulação (25 e 27), como da medição (33 e 35) respectivamente comparados com os valores teóricos esperados (Figura 25b e Figura 27b), é notável que os resultados abaixo de 1000Hz não apresentam o comportamento teórico esperado para o coeficiente de absorção. Porém, o formato da curva para valores acima de 1000 Hz apresenta um comportamento muito próximo do teórico calculado.

Os valores não condizentes encontrados abaixo de 1000Hz se dão ao fato do cálculo dos parâmetros acústicos ter sido realizado assumindo a propagação de onda plana, que é uma aproximação razoável para frequências acima de 1000 Hz, mas não para as baixas frequências, que se propagariam como ondas esféricas. Como para a onda esférica, tanto pressão incidente quanto a refletida dependem da posição, o coeficiente de absorção também será função da posição. Assim, faz diferença nos cálculos a posição de onde a medição está sendo realizada. Idealmente, teria-se que medir exatamente em cima da superfície, porque é este parâmetro que representa a amostra. Mas isso é muito complicado de medir, já que o menor dos microfones estaria a alguma distância da superfície causando diferença na medição. Isto está relacionado com as vantagens e desvantagens em aproximar todo o aparato experimental (fonte, amostra e arranjo de microfones), quanto mais próximo da amostra menor o erro na medição será. Porém, ao colocar o microfone (objeto de tamanho relevante para uma grande parcela dos comprimentos de ondas audíveis) sobre a amostra o campo sonoro naquela região é distorcido, perdendo a qualidade da medição. Além disso, existe a possibilidade de o alto-falante não responder adequadamente para toda essa região de frequência, uma melhor resolução ser necessária na medição, e até

mesmo o fato de que para a câmara fosse perfeitamente anecoica na região de graves, ela precisaria ter uma maior dimensão.

Nos resultados mostrados nas Figuras 36a e 36b, da comparação do método proposto com a medição em tubo de impedância fica evidente que os resultados para a lã de vidro não ficaram correlacionados. Porém, os resultados para a lã de rocha se mostraram promissores dado que a curva encontrada no método proposto circunda a do tubo de impedâncias. Ou seja, existe uma proximidade nos resultados apresentados para ambos os métodos.

Apesar dos aspectos apontados, os resultados são próximos dos valores teóricos calculados para as regiões acima de 1000 Hz indicando que o método usado possui potencial, sendo os principais pontos destacados a seguir:

- A simulação do campo acústico segundo Equação (4.3) mostrou-se adequada.
- Os algoritmos esparsos (SLIM/RELAX) conseguiram identificar a posição das fontes, além de recuperar a relação entre as energias das ondas incidentes e refletidas.
- O ambiente de medição se mostrou adequado, dado que a pressão sonora do ambiente medida em todos os casos tinha um comportamento similar ao da pressão sonora esperada (campo acústico sintético - valor teórico).
- Os resultados encontrados podem ser melhorados, dado que já existem formas para calcular um campo acústico formado por ondas esféricas, melhorando os resultados na região abaixo de 1000Hz. Porém, os resultados apresentados evidenciam a coesão do estudo realizado para a obtenção da impedância de superfície, já que na região acima de 1000Hz existe compatibilidade entre os valores teóricos calculados e os medidos.

7 Conclusão

Para uma melhor estruturação desse capítulo ele será dividido em duas seções. A primeira remetendo aos objetivos apresentados na Seção 1.2. Seguido de uma seção relatando sobre reflexões sobre o trabalho além de sugestões de possíveis trabalhos futuros.

7.1 Avaliação das metas propostas

De forma semelhante ao que foi apresentado na Seção 1.2 serão feitas considerações referentes a cada um dos objetivos serão apresentadas em forma de itens na sua respectiva ordem.

Inicialmente foi necessário fazer um estudo dos principais métodos de caracterização dos propriedades acústicas dos materiais, além da escolha do modelo adequado. Como foi possível observar da leitura do Capítulo 3 a apresentação dos mais relevantes e diversos modelos foram apresentadas. Isso fez com que a escolha do método desejado tenha sido feita de forma fundamentada, já que os benefícios e malefícios eram conhecidos desde o princípio.

Através da escolha do método foi possível gerar o ambiente de teste. Sendo que a simulação desse ambiente teve seus princípios apresentados na Seção 4.1. Além de seus resultados na Seção 6.1. Os resultados apresentados se mostraram corretos de acordo com as referências utilizadas. Realizando o Objetivo 1 desse trabalho.

Como uma extensão do objetivo anterior, e de forma a reafirmar a consistência do método, parâmetros previamente caracterizados foram usados no código da simulação criada. Como pode ser visto na Seção 6.1.2 esses resultados foram condizentes com as referências, concluindo o segundo Objetivo 2 proposto e fazendo com que os próximos passos desse trabalho fossem possíveis.

Através dos bons resultados encontrados na simulação, a etapa (Objetivo 3) subsequente era aplicar esse método de medição em um ambiente real. O ambiente escolhido era com características de campo acústico controlada, isso porque tornaria mais fácil de avaliar como o modelo se comportaria. Assim, caso incoerências fossem aparecendo no decorrer dos testes, seria mais fácil compreendê-las. Como foi apresentado na Seção 6.2 os resultados foram extremamente promissores, apresentando defasagens com os valores esperados e mostrados na região abaixo de 1000Hz.

Por fim, o Objetivo Principal desse trabalho era a medição da impedância acústica *in situ* usando um arranjo de microfones. Este objetivo foi concluído. Por que foi possível caracterizar a impedância acústica usando um arranjo de microfones, obtendo

valores fundamentados em comparações desses mesmos valores teóricos. Porém, o ambiente utilizado possuía um campo acústico controlado, distanciando-o de um ambiente *in situ* propriamente dito.

7.2 Discussões, observações e sugestões

As expectativas sobre esse trabalho foram atendidas. Desde uma construção sólida do que foi proposto, de quais valores poderiam ser esperados (valores teóricos), até na obtenção desses valores com um método que usava de uma compilação de técnicas promissoras (esparsidade), e de outras adaptadas (valores simulados e medidos).

O ponto principal que pode ser melhorado nesse trabalho seria em otimizar os resultados na região abaixo de 1000Hz. Como foi mencionado na Seção 6.3, o modelo para o cálculo dos propriedades acústicas teria que ser refinado, fazendo uso de campo acústico esférico. Dessa forma, o gasto computacional seria maior, porém a melhoria dos resultados na região desejada seria significativo.

Outro ponto que deve ser levado em consideração são os resultados comparados no tudo de impedância (Seção 6.2.4) quando comparados com o método proposto. Principalmente no caso da lâ de vidro os resultados não são aceitáveis. Sugerindo que uma repetição dessa medição é necessária.

Devido ao tempo exigido para a conclusão desse trabalho ele se tornou limitado na diversidade de amostras usadas. Seria interessante que novas medidas fossem realizadas com todos os materiais propostos, onde seria possível calcular um valor médio das várias medições, porém, seria aconselhável que elas fossem realizadas no mesmo período evitando variações de temperatura e umidade no local. Além de que, diferentes materiais já caracterizados poderiam ser expostos a esse método de medição, de forma a torná-lo mais substancial, avaliando seu desempenho para um maior número de amostras.

Além disso, uma abordagem adicional que poderia ser realizada nesse trabalho, ou até mesmo em trabalhos na área de medição de propriedades acústicas, seria no erro agregado a essas medidas, erro esse que dificilmente é mencionado na literatura e que tem um grande potencial em agregar em simulações e futuras pesquisas do assunto.

Por fim, os parâmetros da situação poderiam ser alterados. A construção de um arranjo de microfones com maior número de microfones poderia ser feita, verificando se existe diferença ou melhora nos resultados. Além disso, realizar medição em ambientes acústicos que não são controlados como a câmara anecoica, onde o foco seria observar como o código aqui utilizado se comportaria.

Com esses novos resultados devidamente estudados, seria possível compará-los com os resultados obtidos em outros métodos de medição, especificamente a medição

com tubo de impedância (método normatizado atualmente), afim de que fosse possível apontar qual a viabilidade do uso de arranjo de microfones e técnicas de esparsidade para a medição da impedância acústica *in situ*. Um outro possível resultado dessa comparação seria determinar para quais condições cada um destes métodos pode ser mais adequado para medição de impedância acústica.

Referências

- ALLARD, J.; CHAMPOUX, Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 10, 42 e 50.
- ALLARD, J. F.; CHAMPOUX, Y.; NICOLAS, J. Impedance Measurement At Oblique Incidence and Low Frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 86, n. 2, p. 766–770, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 32.
- ALLARD, J. F.; SIEBEN, B. Measurements of acoustic impedance in a free field with two microphones and a spectrum analyzer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 77(4), p. 1617–1618, 1985. Citado na página 34.
- ATALLA, N.; PANNETON, R.; SGARD, F. C.; OLNY, X. Acoustic absorption of macro-perforated porous materials. *Journal of Sound and Vibration*, v. 243, n. 4, p. 659–678, 2001. ISSN 0022460X. Citado na página 42.
- BRANDÃO, E. Análise teórica e experimental do processo de medição in situ da impedância acústica,” Florianópolis-SC. 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 34.
- BRANDÃO, E. *Acústica de Salas. Projeto e modelagem*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 16, 20, 40, 42, 49 e 51.
- BRANDÃO, E.; FLESCHE, R.; LENZI, A.; FLESCHE, C. Estimation of pressure-particle velocity impedance measurement uncertainty using the Monte Carlo method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 130(1), p. 1–7, 2011. Citado na página 34.
- BRANDÃO, E.; LENZI, A.; CORDIOLI, J. Estimation and minimization of errors caused by sample size effect in the measurement of the normal absorption coefficient of a locally reactive surface. *Applied Acoustics*, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 38.
- BRANDÃO, E.; LENZI, A.; PAUL, S. A review of the in situ impedance and sound absorption measurement techniques. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 101, n. 3, p. 443–463, 2015. ISSN 16101928. Citado 4 vezes nas páginas 15, 24, 34 e 38.
- BRANDÃO, E.; MAREZE, P.; LENZI, A.; SILVA, A. R. da. “Impedance measurement of non-locally reactive samples and the influence of the assumption of local reaction,”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013. Citado na página 33.
- CARNEIRO, E. B. Análise teórica e experimental do processo de medição in situ da impedância acústica. 2011. Citado na página 34.
- CHAMPOUX, Y.; BERRY, A.; AMEDÍN, C. K. Acoustical characterization of absorbing porous materials through transmission measurements in a free field. v. 102, n. 4, p. 1982–1994, 1997. Citado 5 vezes nas páginas 10, 15, 35, 36 e 38.
- CHAMPOUX, Y.; NICOLAS, J.; ALLARD, J. Measurement of acoustic impedance in a free field at low frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, v. 125, n. 2, p. 313–323,

1988. ISSN 0022460X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022460X88902866>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 38.

DAVIES, J. C.; MULHOLLAND, K. A. An impulse method of measuring normal impedance at oblique incidence. *Journal of Sound and Vibration*, v. 67, n. 1, p. 135–149, 1979. ISSN 10958568. Citado na página 25.

DUCOURNEAU, J.; PLANEAU, V.; CHATILLON, J.; NEJADE, A. Measurement of sound absorption coefficients of flat surfaces in a workshop. *Applied Acoustics*, Elsevier Ltd, v. 70, n. 5, p. 710–721, 2009. ISSN 0003682X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.09.001>>. Citado 4 vezes nas páginas 10, 16, 36 e 37.

FONSECA, W. D. Beamforming Considering Acoustic Diffraction over Cylindrical Surfaces,” Florianópolis-SC. 2013. Citado na página 34.

GARAI, M. Measurement of the Sound-Absorption Coefficient In Situ . The Reflection Method Using Periodic Pseudo- random Sequences of Maximum Length. *Applied Acoustics*, v. 39, p. 119–139, 1993. Citado 3 vezes nas páginas 15, 26 e 35.

HADDAD, K.; SONG, W.; HALD, J. In-situ impedance and absorption coefficient estimations using a double-layer microphone array. In: INSTITUTE OF NOISE CONTROL ENGINEERING. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. [S.l.], 2016. v. 253, n. 5, p. 3689–3696f. Citado na página 16.

INGÅRD, U.; BOLT, R. H. A free field method of measuring the absorption coefficient of acoustic materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 23, n. 5, p. 509–516, 1951. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.1906796>>. Citado 4 vezes nas páginas 10, 30, 31 e 38.

ISO-10534-2. *Acoustics determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method*. 1998. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 34.

ISO-354. *Measurement of sound absorption in a reverberation room*. 1985. Citado 4 vezes nas páginas 15, 27, 34 e 38.

JABLONSKI, D. G. A pole-zero deletion method for calculating {Padé} approximates. v. 74, n. 1, p. 217–218, 1986. Citado 3 vezes nas páginas 10, 46 e 47.

JANSENS, G.; LAURIKS, W.; VERMEIR, G.; ALLARD, J. F. Free field measurements of the absorption coefficient for nonlocally reacting sound absorbing porous layers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 112, n. 4, p. 1327–1334, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.1504851>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 34.

JOHNSON, D. H.; DUDGEON, D. E. Array signal processing. 1993. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 39.

KINO, N.; UENO, T. Comparisons between characteristic lengths and fibre equivalent diameters in glass fibre and melamine foam materials of similar flow resistivity. *Applied Acoustics*, v. 69, n. 4, p. 325–331, 2008. ISSN 0003682X. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 55.

- KRUSE, R. Application of the two-microphone method for in-situ ground impedance measurements. v. 93, n. 5, p. 837–842, set. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 34.
- KUTTRUFF, H. *Acoustics - An introduction*. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 0203970896. Citado na página 31.
- LANOYE, R.; VERMEIR, G.; LAURIKS, W.; KRUSE, R.; MELLERT, V. Measuring the free field acoustic impedance and absorption coefficient of sound absorbing materials with a combined particle velocity-pressure sensor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 119, n. 5, p. 2826–2831, 2006. ISSN 0001-4966. Disponível em: <<http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.2188821>>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- LI, J.; STOICA, P. Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 44, n. 2, p. 281–295, 1996. ISSN 1053587X. Citado na página 43.
- MOMMERTZ, E. Angle-dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique. *Applied Acoustics*, v. 46, n. 3, p. 251–263, 1995. ISSN 0003682X. Citado 6 vezes nas páginas 10, 15, 26, 27, 29 e 38.
- MORGAN, P. A.; WATTS, G. R. A novel approach to the acoustic characterisation of porous road surfaces. *Applied Acoustics*, v. 64, n. 12, p. 1171–1186, 2003. ISSN 0003682X. Citado na página 35.
- NASCIMENTO, V. H.; MASIERO, B. S.; RIBEIRO, F. P. Acoustic Imaging Using the Kronecker Array Transform. In: COELHO, R. F.; NASCIMENTO, V. H.; QUEIROZ, R. L. de; ROMANO, J. M. T.; CAVALCANTE, C. C. (Ed.). *Signals and Images: Advances and Results in Speech, Estimation, Compression, Recognition, Filtering, and Processing*. [S.l.]: CRC Press, 2015. p. 153–178. ISBN 978-1498722360. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 40.
- OTTINK, M.; BRUNSKOG, J.; JEONG, C.-H.; FERNANDEZ-GRANDE, E.; TROJGAARD, P.; TIANA-ROIG, E. In situ measurements of the oblique incidence sound absorption coefficient for finite sized absorbers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 139, n. 1, p. 41–52, 2016. ISSN 0001-4966. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/139/1/10.1121/1.4938225>>. Citado na página 16.
- QIN, S.; ZHANG, Y. D.; AMIN, M. G. Generalized coprime array configurations for direction-of-arrival estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 63, n. 6, p. 1377–1390, 2015. ISSN 1053587X. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 47.
- RICHARD, A.; FERNANDEZ-GRANDE, E.; BRUNSKOG, J.; JEONG, C.-h. Impedance estimation of a finite absorber based on spherical array measurements. In: *Proc. 22nd International Congress on Acoustics*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 35.
- SIDES, D. J.; MULHOLLAND, K. A. The variation of normal layer impedance with angle of incidence. *Journal of Sound and Vibration*, v. 14, n. 1, p. 139–142, 1971. ISSN 10958568. Citado na página 30.
- 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*, v. 66, n. 7, p. 845–865, 2005. ISSN 0003682X. Citado na página 35.
- TAMURA, M. Spatial Fourier transform method of measuring reflection coefficients at oblique incidence. I: Theory and numerical examples. v. 88, n. November, p. 2259–2264, 1990. Citado 4 vezes nas páginas 10, 32, 33 e 38.
- TIJS, E.; BREE, H. E. D.; BRANDÃO, E. “In situ PU surface impedance measurements for quality control in an assembly line,”. *Proceedings of SAE international*, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 34.
- TIJS, E.; BREE, H. E. D.; BRANDÃO, E. Large scale in situ acoustic reflection measurements in a theatre. *Nag/Daga*, p. 549–552, 2009. Citado na página 15.
- TIJS, E.; BREE, H.-E. d.; BRANDÃO, E. Large scale in situ acoustic reflection measurements in a theatre. In: . [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 34.
- VERTATSCHITSCH, E.; HAYKIN, S. Nonredundant arrays. *Proceedings of the IEEE*, v. 74, n. 1, p. 217–217, Jan 1986. ISSN 0018-9219. Citado na página 46.
- VORLÄNDER, M. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality (RWTHedition)*. [S.l.]: Springer, 2007. 335 p. ISBN 3540488294. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 34.
- WANG, Y.; LI, J.; STOICA, P.; SHEPLAK, M.; NISHIDA, T. Wideband RELAX and wideband CLEAN for aeroacoustic imaging. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 115, n. 2, p. 757–767, 2004. ISSN 00014966. Citado 7 vezes nas páginas 10, 16, 40, 43, 51, 53 e 63.
- WANG, Z.; LI, J.; STOICA, P.; NISHIDA, T.; SHEPLAK, M. Constant-beamwidth and constant-powerwidth wideband robust Capon beamformers for acoustic imaging. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 116, n. 3, p. 1621–1631, 2004. ISSN 0001-4966. Disponível em: <<http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1744751>>. Citado na página 43.
- XU, L.; ZHAO, K.; LI, J.; STOICA, P. Wideband source localization using Sparse Learning via Iterative Minimization. *Signal Processing*, Elsevier, v. 93, n. 12, p. 3504–3514, 2013. ISSN 01651684. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.04.005>>. Citado 7 vezes nas páginas 10, 16, 40, 43, 51, 52 e 63.
- YAN, S.; MA, Y.; HOU, C. Optimal array pattern synthesis for broadband arrays. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 122, n. 5, p. 2686–2696, 2007. ISSN 00014966. Citado na página 43.
- YARDIBI, T.; LI, J.; STOICA, P.; CATTAFESTA, L. N. Sparsity constrained deconvolution approaches for acoustic source mapping. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 123, n. 5, p. 2631–2642, 2008. ISSN 00014966. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 40.
- YUZAWA, M. A method of obtaining the oblique incident sound absorption coefficient through an on-the-spot measurement. *Applied Acoustics*, v. 8, n. 1, p. 27–41, 1975. ISSN 0003682X. Citado 4 vezes nas páginas 10, 21, 24 e 25.

ZANONI, G. P. *Caracterização acústica de materiais com dupla porosidade usando lãs minerais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Campinas, 2018. Citado 6 vezes nas páginas 11, 17, 45, 49, 61 e 69.

ANEXO A – Microfone Gras 26CA

½-inch Preamplifier Type 26CA

Product Data and Specifications

Typical applications

- **CCP inputs (ICP®)**
- **Prepolarized microphones**
- **½-inch precision microphones**
- **High levels and high frequencies**

The G.R.A.S. ½-inch Preamplifier Type 26CA is a general purpose preamplifier optimized for use with prepolarized condenser microphones. It is a small, robust unit and uses a G.R.A.S. CCP power supply (ICP®), e.g. Type 12AL. It has a very low inherent noise level, a large dynamic range and a frequency response from below 2 Hz to above 200 kHz.

Its small ceramic thick-film substrate has a very high input impedance, and is shielded by a guard ring to minimise the influence of stray capacitance and microphonic interference.

The Type 26CA is delivered with a built-in TEDS* chip, and can be programmed as a single unit with a microphone fitted.

Specifications

Frequency response (cable load 4.7 nF):	
2.5 Hz - 200 kHz	±0.2 dB
Input impedance:	
	20 GΩ, 0.4 pF
Output impedance (Cs = 20 pF, f=1000Hz):	
	(typically <25 Ω)
Noise (measured with 20 pF ½-inch dummy mic.):	
A-weighted:	≤2.5 μV rms (typically 1.8 μV rms)
Linear (20 Hz - 20 kHz):	≤6 μV rms (typically 3.5 μV rms)
Gain*:	
Typically:	-0.30 dB
Power-supply:	
	2 mA to 20 mA (typically 4 mA)



½-inch Preamplifier Type 26CA

It can be used with all G.R.A.S. prepolarized microphones, namely:

½-inch microphones:

Types 40AE, 40AD and 40AQ

¼-inch microphones:

Types 40BE and 40BD, using the optional ½-inch to ¼-inch adaptor RA0019

It has an integrated BNC output connector.

The casing is made of stainless steel for maximum strength and durability.

® ICP is a registered trademark of PCB Piezotronics Inc.

* Transducer Electronic Data Sheet - as proposed by IEEE-P1451.4

Maximum signal-output voltage (peak):	
	±8.0 V
Temperature:	
Operation:	-30 °C to +70 °C
Storage:	-40 °C to +85 °C
Relative humidity:	
Operation:	0 to 95 %
Storage:	0 to 95 %
Connector type:	
	BNC
Dimensions and weight:	
Diameter:	12.7 mm (½-inch)
Length:	73 mm (2.9 inches)
Weight:	26 g (0.9 oz)

* Measured with 20 pF ½" dummy microphone

G.R.A.S. Sound & Vibration reserves the right to change specifications and accessories without notice

G.R.A.S.
Sound & Vibration

Skovlytoften 33
2840 Holte, Denmark
Tel +45 45 66 40 46 Fax +45 45 66 40 47
e-mail: gras@gras.dk www.gras.dk

ANEXO B – Alto-falante Yamaha HS5

HS Series

Powered Studio Monitor

HS5



HS5 Rear Panel



HS7



HS7 Rear Panel



HS8



HS8 Rear Panel



HS8S



HS8S Rear Panel



Near-field powered studio monitors with stunning accuracy and exceptionally flat response

HS5

- 2-way bass-reflex bi-amplified near-field studio monitor with 5" cone woofer and 1" dome tweeter
- 55Hz - 28kHz frequency response (-10db)
- 45W LF plus 25W HF bi-amp system for high-performance 70W power amplification
- ROOM CONTROL and HIGH TRIM response controls
- XLR and TRS phone jack inputs accept balanced or unbalanced signals

HS8

- 2-way bass-reflex bi-amplified near-field studio monitor with 8" cone woofer and 1" dome tweeter
- 42Hz - 28kHz frequency response (-10db)
- 75W LF plus 45W HF bi-amp system for high-performance 120W power amplification
- ROOM CONTROL and HIGH TRIM response controls
- XLR and TRS phone jack inputs accept balanced or unbalanced signals

HS7

- 2-way bass-reflex bi-amplified near-field studio monitor with 6.5" cone woofer and 1" dome tweeter
- 50Hz - 28kHz frequency response (-10db)
- 60W LF plus 35W HF bi-amp system for high-performance 95W power amplification
- ROOM CONTROL and HIGH TRIM response controls
- XLR and TRS phone jack inputs accept balanced or unbalanced signals

HS8S

- 8" bass-reflex powered subwoofer delivers low frequencies down to 30Hz
- 30Hz- 180Hz frequency response (-10db)
- High-power 150W amplifier exclusively designed for low frequencies
- LOW CUT switch, LOW CUT control (80-120Hz), HIGH CUT control (80-120 Hz) and PHASE switch allow users to set up a sub-woofer system with simple connections and no additional equipment.
- XLR and TRS phone connectors for inputs, and XLR connectors for L and R and EXT SUB outputs.

HS Series

GENERAL SPECIFICATIONS

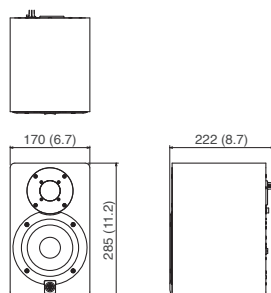
Model	HS5	HS7	HS8	HS8S
System Type	2-way bi-amp powered speaker			Powered subwoofer
Frequency response (-10dB)	54Hz – 30kHz	43Hz – 30kHz	38Hz – 30kHz	22Hz – 160Hz
Crossover frequency	2kHz	2kHz	2kHz	-
Components	LF	6.5" cone	8" cone	8" cone
	HF	1" dome	1" dome	-
Output Power*	Total	95W	120W	150W (4Ω)
	LF	60W (4Ω)	75W (4Ω)	-
	HF	35W (8Ω)	45W (8Ω)	-
Input sensitivity, Impedance	-10 dBu/10kΩ			-
Output level, Impedance	-			-10dBu/600Ω
Input connectors (Parallel)	XLR3-31 (Balanced) PHONE (Balanced)			XLR3-31 (Balanced) x 2 PHONE (Balanced) x 2
Output connectors	-			XLR3-32 (Balanced) x 2 (L&R) XLR3-32 (Balanced) x 1 (EXT SUB)
Control switch	LEVEL control (+4 dB, center click) EQ: HIGH TRIM switch (+/- 2 dB at HF). : ROOM CONTROL switch (0/-2/-4 dB under 500Hz)			LEVEL control PHASE switch (NORM./REV.) HIGH CUT control (80 – 120 Hz, center click) LOW CUT control (80 – 120 Hz, center click) LOW CUT switch (ON/OFF)
Indicator	Power on: White LED			-
Power consumption	45W	55W	60W	70W
Enclosure	Type: Bass-reflex type Material: MDF			-
Dimensions (W x H x D)	170 x 285 x 222mm (6.7" x 11.2" x 8.7")	210 x 332 x 284mm (8.3" x 13.1" x 11.2")	250 x 390 x 334mm (9.8" x 15.4" x 13.1")	300 x 350 x 389mm (11.8" x 13.8" x 15.3")
Weight	5.3 kg (11.7 lbs)	8.2 kg (18.1 lbs)	10.2 kg (22.5 lbs)	12.5 kg (27.6 lbs)

* Dynamic power

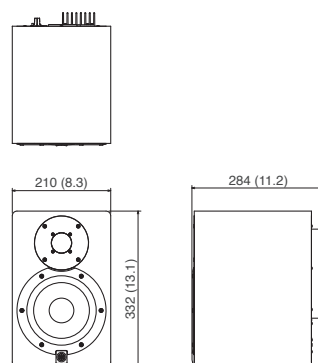
DIMENSIONS

unit : mm (inch)

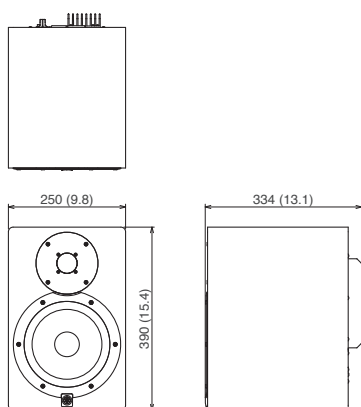
HS5



HS7



HS8



HS8S

