

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB GAMA/ FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AMOSTRAS
CONFECCIONADAS COM A FIBRA EXTRAÍDA DO PSEUDOCAULE
DA BANANEIRA (*Musa spp.*)

CLÁUDIA OHANA BORGES MENDES

ORIENTADORA: PROF^a. DR^a. MARIA ALZIRA DE ARAÚJO NUNES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

PUBLICAÇÃO: FGA.DM – 088A/2020

BRASÍLIA/DF: 10/2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB GAMA/ FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

CLÁUDIA OHANA BORGES MENDES

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AMOSTRAS
CONFECCIONADAS COM A FIBRA EXTRAÍDA DO PSEUDOCAULE
DA BANANEIRA (*Musa* spp.)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA
ENGENHARIA DA FACULDADE DO GAMA E FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.

ORIENTADORA: PROF^a. DR^a. MARIA ALZIRA DE ARAÚJO NUNES

BRASÍLIA/DF

2020

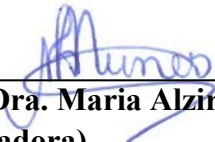
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB GAMA/ FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AMOSTRAS
CONFECCIONADAS COM A FIBRA EXTRAÍDA DO PSEUDOCAULE
DA BANANEIRA (*Musa spp.*)

CLÁUDIA OHANA BORGES MENDES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE DO GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



Prof. Dra. Maria Alzira de Araújo Nunes; FGA/UnB
(Orientadora)



Prof. Dr. Marcus Vinicius Girão de Moraes; FT/UnB
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Divino Eterno Teixeira; LPF/SFB
(Examinador Externo)

Brasília, 15/out/2020

FICHA CATALOGRÁFICA

CLAUDIA OHANA BORGES MENDES.
CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AMOSTRAS CONFECCIONADAS COM A FIBRA EXTRAÍDA DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA (*Musa spp.*), Distrito Federal, 2020.

148 p. 210 x 297 mm. (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2020).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

1. TUBO DE IMPEDÂNCIA

2. SUSTENTABILIDADE

3. ABSORÇÃO SONORA

4. PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA

I. FGA/FT/UnB

II. Mestre (FGA.DM 088A/2020)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENDES, C. O. B. (2020). CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AMOSTRAS CONFECCIONADAS COM A FIBRA EXTRAÍDA DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA (*Musa spp.*). Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, Publicação: FGA.DM 088A/2020, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 148.p.

CESSÃO DE DIREITOS

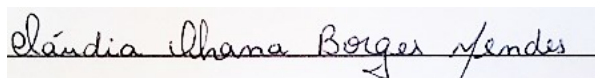
AUTOR: CLÁUDIA OHANA BORGES MENDES

TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AMOSTRAS CONFECCIONADAS COM A FIBRA EXTRAÍDA DO PSEUDOCAULE DA BANANEIRA (*Musa spp.*).

GRAU: Mestre

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.



CLÁUDIA OHANA BORGES MENDES

claudiaohanamendes@hotmail.com

A minha mãe Irene (em memória)

A minha mãe/tia Valéria

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força.

A minha orientadora Dra. Maria Alzira, pelo apoio, paciência, atenção e ensinamentos que contribuíram com meu aperfeiçoamento profissional.

Ao meu namorado Tiago Bento, por ter ajudado com a elaboração deste trabalho e pelo auxílio com as disciplinas ao longo do mestrado.

Aos professores Dr. Divino Teixeira, Dr. Marcus Vinicius Girão, Dra. Roseany Vasconcelos e Dra. Rosineide Miranda pelas contribuições que engrandeceram este estudo.

A minha tia/mãe Valéria, ao meu irmão Jefferson e aos meus primos/irmãos Paulo e Wisley pelo apoio.

A minha tia Vanderléia por, mesmo tão distante, ter sido tão presente nos dias difíceis.

Aos meus amigos Nikolas, Danielle e Leandra pelo carinho e motivação.

Aos pais do Tiago Bento, Divina e Waldison, pelo carinho.

Aos meus sobrinhos Emy, Thur e Mari e ao meu irmãozinho de coração Davi, por serem as crianças mais fofas do mundo.

A coordenadora do curso de química da UEG pelo hidróxido de sódio, aos funcionários do galpão da UnB, Danilo e Matheus, pelo auxílio com a fabricação dos moldes cilíndricos, ao Lincon por me deixar usar a balança de precisão, ao Davi do GMASSA e aos colegas de laboratório Marcos e Maria pelos momentos de distração.

A CAPES pelo apoio financeiro sem o qual o mestrado não teria ocorrido.

As tias do RU pelo carinho.

A todos que de alguma forma contribuíram com a execução deste trabalho.

RESUMO

O estudo das propriedades acústicas das fibras naturais ganhou grandes proporções nos últimos anos, isto se deve ao fato de que a preocupação com a prevenção das fontes não renováveis exigiu a busca por novos materiais sustentáveis. Nesse sentido, esta pesquisa teve como objetivo determinar o coeficiente de absorção sonora, o NRC (*noise reduction coefficient*) e a perda de transmissão (*Transmission Loss*, TL) de amostras de diferentes densidades e espessuras confeccionadas com a fibra extraída do pseudocaule da bananeira. Primeiramente confeccionou-se amostras utilizando somente a fibra, sem adição de ligantes. Posteriormente, construiu-se amostras com a fibra e uma cola natural fabricada com polvilho e água. Além disso, sugeriu-se uma aplicação das amostras por meio da inserção das mesmas no interior de um painel sanduíche formado por camadas externas de gesso. Após a metodologia experimental desenvolveu-se um modelo numérico em método dos elementos finitos (MEF) de um tubo de impedância contendo, em uma das extremidades do tubo, uma amostra do material estudado, para isto utilizou-se o *software* ANSYS® *Workbench*. Verificou-se a absorção sonora das amostras conforme os conceitos apresentados na ISO 10534-2. Nos resultados verificou-se que todas as amostras confeccionadas apresentaram baixo potencial de absorção sonora nas bandas de um terço de oitava de 100 a 6300 Hz. No entanto, a inserção das amostras no interior do painel sanduíche melhorou o isolamento sonoro do painel. A metodologia numérica mostrou-se eficaz.

Palavras-Chaves: tubo de impedância; fibra de bananeira; coeficiente de absorção sonora; perda de transmissão; sustentabilidade.

ABSTRACT

The study of acoustic properties in natural fibers has gained large proportions over the past years. This is because of the concern over decreasing the use of non-renewable sources, which demanded the search for new sustainable materials. Thus, the present investigation had the objective of determining the noise reduction coefficient (NCR) and transmission loss (TL) of samples with different densities and thicknesses, made of fibers extracted from the banana pseudostem fiber. Samples were first made using only the fiber, without adding binders. Other samples were then constructed with fibers and a natural glue made of cassava starch and water. Samples were then applied to the inner part of a sandwich panel formed by outer layers of plaster. After applying the experimental methodology, a numeric model was developed through the finite element method (FEM) of an impedance tube containing a sample of the material studied in one of its extremities. To do so, the software ANSYS® Workbench was used. Sound absorption of the samples was observed according to the concepts presented in ISO 10534-2. All samples produced presented low potential for sound absorption for one-third octave bands from 100 to 6300 Hz. However, adding the samples to the core of the sandwich panel improved its sound isolation. The numeric methodology was effective.

KEYWORDS: impedance tube; banana fiber, sound absorption coefficient; transmission loss; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapeamento de ruído	14
Figura 2 – Coco: (a) fibra (b) placa de absorção acústica desenvolvida com a fibra.....	15
Figura 3 - Materiais sustentáveis desenvolvidos com a fibra de bananeira: (a) fruteira (b) revestimento para cadernos.	16
Figura 4 - Fluxograma da metodologia aplicada.	18
Figura 5 - Lã de ovelha.....	21
Figura 6 - Amostras com madeira: (a) fibra natural (b) mineralizada.	21
Figura 7 - Amostras de bambu laminado colado.	23
Figura 8 - Bambu: (a) fibra alongada mercerizada (b) amostra construída com a fibra	23
Figura 9 - Amostras de fibra de bambu: (a) para ensaio no tubo de impedância (b) ensaio na câmara reverberante.....	24
Figura 10 - Casos estudados.	25
Figura 11 - Amostras de fibra de coco: (a) para ensaio no tubo de impedância (b) para ensaio na minicâmara reverberante.....	26
Figura 12 - Amostras de fibra de coco.	26
Figura 13 - Fibra de cânhamo.....	27
Figura 14 - Cânhamo: (a) diferentes espessuras estudadas (b) amostras para o ensaio no tubo de impedância.....	28
Figura 15 - Amostra de cânhamo com adição de borracha natural.	29
Figura 16 - Fibra de sisal: (a) sem processamento (b) painel.	29
Figura 17 - Palha seca: (a) fibra (b) amostra construída a partir da fibra.....	30
Figura 18 - Juta: (a) fibra (c) fibra com adição de latex	30
Figura 19 - Juncos gigantes: (a) árvores (b) triturados (c) grãos armazenados em sacos (d) material emoldurado (e) aplicação da placa	31
Figura 20 - Luffa: (a) fibra (b) fibra cortada para o ensaio (c) fibra com adição de Poliols e Isocianato.....	32
Figura 21 - Amostras construídas com 50 g de fibra de cana e 0,5 g de cola branca, fibra com tamanhos de aproximadamente: (a) 0,70 mm (b) 1,68 mm (c) 0,70 e 1,68 mm.	33
Figura 22 - Cana de açúcar: (a) fibra alongada mercerizada (b) amostra construída a partir da fibra.....	34
Figura 23 - Kapok.....	34
Figura 24 - Amostras para a determinação do coeficiente de absorção sonora.....	35

Figura 25 - Características das amostras: (a) amostra N7 (b) amostra N15.....	36
Figura 26 - Amostras de cortiça com 3 cm de espessura.	36
Figura 27 - – Mesocarpo da Palmeira: (a) fibra (b) amostra construída a partir da fibra	37
Figura 28 - Polpa de beterraba desidratada: (a) partículas entre 8 a 10 mm (b) amostra confeccionada com as partículas e amido de batata.	38
Figura 29 - Yucca: (a) planta (b) amostras de 30 mm de espessura confeccionadas com a fibra.	38
Figura 30 - Amostras de semente: (a) azeitona (b) cereja (c) damasco (d) pêssgo.	39
Figura 31 - Bananeira: (a) fibra (b) Amostra 2A confeccionada com a fibra	40
Figura 32 - Propagação sonora de ondas planas.....	43
Figura 33 – Lã de vidro: (a) manta (b) aplicação em parede <i>drywall</i>	45
Figura 34 – Estrutura dos materiais de dissipação de energia: (a) porosos (b) fibrosos.	46
Figura 35 - Absorção de som por uma superfície.....	46
Figura 36 - Equipamentos empregados no cálculo do coeficiente de absorção sonora	47
Figura 37 – Transmissão de som entre diferentes meios.....	50
Figura 38 - Reflexão do som por material poroso.	50
Figura 39 - Estrutura da bananeira.	52
Figura 40 – Bananeira: (a) plantação (b) local de retirada da planta.....	54
Figura 41 – Pseudocaule: (a) extração (b) após o corte.....	55
Figura 42 – Bainhas: (a) separação (b) cortes longitudinais (c) cortes transversais.....	55
Figura 43 – Partes que compõem a bainha.	56
Figura 44 – Processo de extração das fibras.....	56
Figura 45 - Procedimento adotado para a extração da fibra do pseudocaule da bananeira (<i>Musa spp.</i>).....	57
Figura 46 - Processo de fabricação das amostras A	59
Figura 47 – Amostras de fibra do pseudocaule da bananeira: (a) A1 (b) A2 (c) A3 (d) A4 (e) A5 (f) A6 (g) A7 (h) A8.	59
Figura 48 – Formato das amostras B.	60
Figura 49 - Fabricação das amostras de gesso.....	61
Figura 50 - Amostras em formato de sanduíche com fibra do pseudocaule da bananeira e gesso: (a) B1 (b) B2 (c) B3 (d) B4 (e) B5 (f) B6 (g) B7 (h) B8.....	62
Figura 51 - Processo de fabricação das amostras C.	64
Figura 52 - Amostras desenvolvidas com a fibra do pseudocaule da bananeira e cola natural: (a) C1 (b) C2 (c) C3 (d) C4 (e) C5 (f) C6 (g) C7 (h) C8.....	65

Figura 53 - Pannel sanduíche acústico.	66
Figura 54 - Distância e diâmetro, em milímetros, dos furos do pannel perfurado Knauf, valores em mm.	67
Figura 55 - Processo de produção das amostras de gesso perfurado.	67
Figura 56 - Formato das amostras D.	68
Figura 57 - Amostras em formato de pannel sanduíche com camadas externas de gesso e internas de fibra do pseudocaulé da bananeira e cola natural: (a) D1 (b) D2 (c) D3 (d) D4 (e) D5 (f) D6 (g) D7 (h) CD8.	68
Figura 58 – Equipamentos utilizados nos ensaios experimentais.	69
Figura 59 - Procedimento de medição simplificado.	70
Figura 60 - Calibração dos microfones: (a) equipamentos (b) configuração no <i>software</i> VA-Lab4.	71
Figura 61 - Verificação do ruído de fundo.	72
Figura 62 – Tubos e equipamentos empregados no procedimento experimental.	73
Figura 63 – Configuração do <i>software</i> VA-Lab4.	73
Figura 64 – Procedimento prévio às medições: (a) inserção da amostra no porta-amostra (b) introdução do porta-amostra no tubo (c) verificação da posição dos microfones.	74
Figura 65 - Troca da posição dos microfones.	74
Figura 66 – Medição com o tubo de 30 mm de diâmetro interno.	75
Figura 67 - Procedimento prévio às medições: (a) inserção da amostra no tubo (b) acoplamento dos tubos e verificação da posição dos microfones.	76
Figura 68 - Acoplamento dos tubos e inserção dos microfones nas posições.	76
Figura 69 – Dimensões, em mm, utilizadas na simulação numérica para os tubos: (a) 1 (b) 2.	78
Figura 70 - Modelo geométrico do interior do tubo de impedância.	79
Figura 71 - Tubo discretizado por MEF.	80
Figura 72 - Condições de contorno aplicadas no tubo de impedância.	81
Figura 73 – Condição de contorno <i>Impedance Boundary</i> : (a) seleção (b) indicação da impedância dependendo da frequência (c) inserção dos dados.	81
Figura 74 – Seleção dos nós para captação da pressão sonora.	82
Figura 75 - Coeficientes de absorção sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras A (configuração 1).	85
Figura 76 - Coeficientes de absorção sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras B (configuração 2).	86

Figura 77 - Comparação entre as amostras B7 e B8 e dois painéis de gesso com diferentes espessuras e com o interior sem preenchimento.....	87
Figura 78 - Coeficientes de absorção sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras C (configuração 3).....	88
Figura 79 - Coeficientes de absorção sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras D (configuração 4).....	90
Figura 80 - Comparação entre as amostras D1 e D8 e dois painéis de gesso com diferentes espessuras e com o interior sem preenchimento.....	91
Figura 81 – Comparação entre os coeficientes de absorção sonora das amostras A7 e C8, da fibra de vidro, sisal e coco.....	92
Figura 82 - Comparação entre os NRC das amostras confeccionadas.	99
Figura 83 - Perda de transmissão sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras B (configuração 2).....	107
Figura 84 - Comparação entre as amostras B7 e B8 e dois painéis de gesso com diferentes espessuras e com o interior sem preenchimento.....	108
Figura 85 - Perda de transmissão sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras D (configuração 4).....	109
Figura 86 - Comparação entre as amostras D7 e D8 e dois painéis de gesso com diferentes espessuras e com o interior sem preenchimento.....	110
Figura 87 – Análise de convergência de malha para o tubo de 60 mm de diâmetro.....	111
Figura 88 - Análise de convergência de malha para o tubo de 30 mm de diâmetro.....	112
Figura 89 - Coeficientes de absorção sonora na banda de um terço de oitava da amostra A1 obtidos por meio da metodologia experimental e numérica.....	113
Figura 90 - Coeficientes de absorção sonora na banda de um terço de oitava da amostra B8 obtidos por meio da metodologia experimental e numérica.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Amostras confeccionadas e estudadas.....	22
Tabela 2 - Materiais utilizados para a construção das amostras.....	32
Tabela 3 - Características das amostras desenvolvidas	40
Tabela 4 – Matriz de planejamento.	51
Tabela 5 - Níveis e fatores adotados no planejamento fatorial.....	58
Tabela 6 – Matriz de planejamento com os níveis e fatores adotados para as amostras A.	58
Tabela 7 - Níveis e fatores adotados no planejamento fatorial para a configuração 2.	60
Tabela 8 - Matriz de planejamento com os níveis e fatores adotados para as amostras B.	61
Tabela 9 - Matriz de planejamento das amostras C.....	63
Tabela 10 - Matriz de planejamento com os níveis e fatores adotados para as amostras D.	66
Tabela 11 – Casos simulados, espaçamentos entre os microfones e faixa de frequência.	79
Tabela 12 – NRC das amostras A (configuração 1).	93
Tabela 13 – NRC das amostras B (configuração 2).	94
Tabela 14 - NRC das amostras C (configuração 3).	96
Tabela 15 - NRC das amostras D (configuração 4).	97
Tabela 16 - Comparação entre a amostra A7 e diferentes materiais reutilizados.....	100
Tabela 17 - Matriz de planejamento das amostras A com os NRC.	100
Tabela 18 – Interação entre fatores das amostras A e seus respectivos erros padrão (%).	101
Tabela 19 - Valores dos efeitos principais e interações das amostras A.	101
Tabela 20 - Matriz de planejamento das amostras B com os NRC.	102
Tabela 21 - Interação entre fatores das amostras B e seus respectivos erros padrão (%).	102
Tabela 22 - Valores dos efeitos principais e interações das amostras B.	103
Tabela 23 - Matriz de planejamento das amostras C com os NRC.	103
Tabela 24 - Interação entre fatores das amostras C e seus respectivos erros padrão (%).	104
Tabela 25 - Valores dos efeitos principais e interações das amostras C.	104
Tabela 26 - Matriz de planejamento das amostras D com os NRC.	105
Tabela 27 - Interação entre fatores das amostras D e seus respectivos erros padrão (%).	105
Tabela 28 - Valores dos efeitos principais e interações das amostras D.	106

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA

3D	Tridimensional
FLUID3D	Fluido Acústico 3D
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização).
MEF	Método dos elementos finitos
NRC	<i>Noise reduction coefficient</i> (Coeficiente de redução Sonora)
TL	<i>Transmission Loss</i> (Perda de transmissão)

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	14
1.1 MOTIVAÇÃO	15
1.2 OBJETIVO.....	17
1.2.1 Objetivos específicos.....	17
1.3 METODOLOGIA	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 FIBRA DE BANANEIRA	39
CAPÍTULO III - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	41
3.1 SOM E RUÍDO	42
3.2 ONDA SONORA PLANA	43
3.3 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA	44
3.4 ABSORÇÃO SONORA	45
3.4.1 ISO 10534-2:1998	47
3.4.2 COEFICIENTE DE REDUÇÃO SONORA	48
3.5 PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA.....	49
3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	51
3.7 CULTURA E ESTRUTURA DA BANANEIRA	52
CAPÍTULO IV - METODOLOGIA.....	54
4.1 EXTRAÇÃO DA FIBRA	54
4.2 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS	57
4.2.1 Configuração 1.....	57
4.2.2 Configuração 2.....	60
4.2.3 Configuração 3.....	62
4.2.4 Configuração 4.....	65
4.3 ENSAIO EXPERIMENTAL NO TUBO DE IMPEDÂNCIA	69
4.3.1 Calibração dos microfones	70
4.3.2 Verificação do ruído de fundo.....	71
4.3.3 Determinação do coeficiente de absorção sonora.....	72
4.3.4 Determinação da perda de transmissão sonora.....	75
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	77

4.5 MODELO NUMÉRICO	77
CAPÍTULO V - RESULTADOS.....	83
5.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	83
5.1.1 Coeficiente de absorção sonora	83
5.1.2 <i>Noise Reduction Coefficient</i> (NRC)	92
5.1.3 Planejamento fatorial completo	100
5.1.4 Perda de Transmissão sonora	106
5.2 METODOLOGIA NUMÉRICA	110
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES.....	114
CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS.....	116
APÊNDICA A – CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS.....	126
APÊNDICE B – ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA.....	129
APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	131

O conforto ambiental está ligado a satisfação de um indivíduo quando esse é inserido em um determinado local. Há inúmeras variáveis fundamentais para a caracterização de um ambiente como satisfatório, como, por exemplo, temperatura, iluminação, umidade e o nível de ruído.

Nesse sentido, destaca-se que os baixos níveis de ruídos estão associados ao alcance do conforto acústico, sendo esse uma avaliação do ambiente sonoro segundo a percepção do ouvinte (CHEN e KANG, 2017). Para Santos *et al.* (2012) um local onde há conforto acústico é caracterizado como um ambiente que não há ruídos indesejados e que proporciona bem-estar ao ser humano.

Existem diversas fontes de ruídos que podem causar incomodo no interior de uma edificação, como uma simples conversa entre pessoas, ruídos provenientes de automóveis que circulam por avenidas próximas à edificação, entre outros. Em busca do conforto acústico, pesquisadores tem realizado o mapeamento de ruído em grandes centros urbanos. Tal mapa tem como finalidade indicar as zonas onde há maiores níveis de ruído, tornando possível a adoção de medidas preventivas aos riscos de perda de audição ocasionado pela exposição ao ruído. A Figura 1 demonstra um exemplo de mapeamento de ruído, onde as cores vermelha e roxa representam locais com alto nível de ruído, sendo acima de 68 dB (A), e a cor verde indica ruído inferior a 54 dB (A).

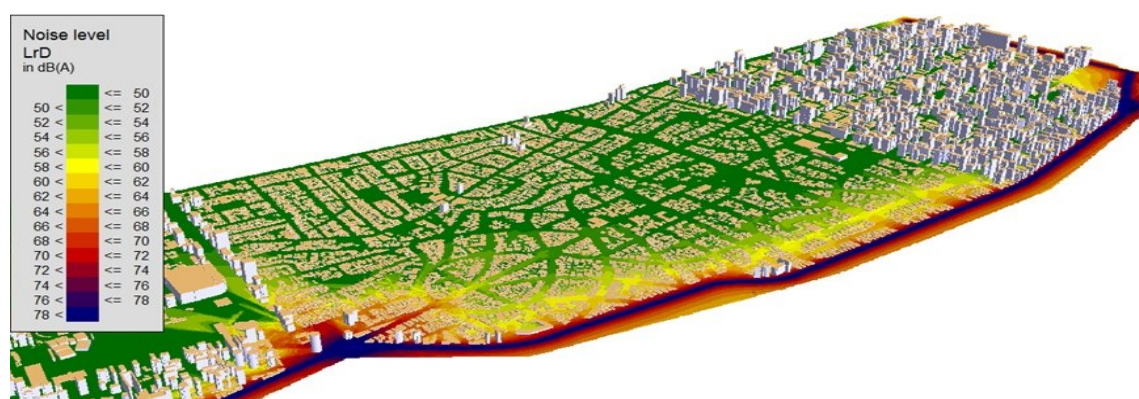


Figura 1 – Mapeamento de ruído (IPT, 2019).

Há diversos materiais que podem contribuir para a diminuição do ruído no interior de uma edificação. Entre os materiais mais empregados para a redução do ruído há a fibra de vidro, material que, quando degradado, pode gerar problemas de saúde ao ser humano devido a inalação dos pequenos fragmentos dos quais o material é composto (ECYCLE, 2019). Há também a lã de rocha, que possui bom desempenho acústico em médias e altas frequências (CROCE, 2018), no entanto, para a produção desse material, rochas basálticas vulcânicas são degradadas (TRISOFT, 2019). Com base nesse conhecimento, percebe-se a necessidade do desenvolvimento de novos materiais utilizando matérias-primas de fontes renováveis.

Pesquisadores tem desenvolvido novos materiais acústicos sustentáveis que podem ser aplicados nas construções civis para a absorção e o isolamento de som. Entre as fibras estudadas está a fibra de coco (NOR *et al.*, 2004), palmeira (LATIF *et al.*, 2015), cana de açúcar e bambu (OUTA, 2017), sisal (AZEVEDO e NABUCO, 2005), e outros. A Figura 2 (a) e (b) apresenta a fibra extraída do coco e uma placa de absorção acústica desenvolvida a partir da fibra.



Figura 2 – Coco: (a) fibra (b) placa de absorção acústica desenvolvida com a fibra (COQUIM, 2019).

Dentre os materiais naturais que podem ser empregados para a absorção acústica há a fibra retirada do pseudocaule da bananeira (DERMACHI, 2010). O uso de tal material torna-se viável após a produção e retirada das bananeiras. Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se a verificar o potencial acústico da fibra extraída do pseudocaule da bananeira.

1.1 MOTIVAÇÃO

O Brasil, em um estudo realizado pela EMBRAPA (2012), foi apontado, na época, como o quarto maior produtor mundial de bananas, alcançando 7,1 milhões de toneladas ao longo de 2012. O Centro Oeste brasileiro, entretanto, representava no ano de 2017, uma pequena porcentagem da quantidade total de produção, correspondendo a 5% do total de

bananas produzidas no Brasil (EMBRAPA, 2017), o que equivale a 303 mil toneladas de bananas.

Após a extração da banana, o pseudocaule da bananeira é cortado e descartado, normalmente, na natureza (ATHAYDE, 2014). Entretanto, o pseudocaule pode ser reaproveitado para diversos fins: (a) Athayde (2014) sugere a utilização do material para a geração de energia, (b) Gonçalves Filho (2011) para a fermentação alcoólica, (c) Silva (2016) fabricação de etanol de segunda geração, (d) Coelho *et al.* (2011) de palmito, entre outros.

Dentre as possibilidades de reaproveitamento está a aplicação do pseudocaule ou da fibra extraída do mesmo para a confecção de materiais artesanais. Nesse sentido, a Cooperativa Gente de Fibra tem desenvolvido trabalhos artesanais com a fibra (Figura 3 (a)) e a Tamoios Tecnologia desenvolveu um revestimento sustentável, a partir da fibra, que pode ser aplicado como papel de parede, revestimento de móveis e objetos, etc. A Figura 3 (b) demonstra um caderno revestido com o produto desenvolvido pela Tamoios Tecnologia.



Figura 3 - Materiais sustentáveis desenvolvidos com a fibra de bananeira: (a) fruteira (GENTE DE FIBRA, 2019) (b) revestimento para cadernos (TAMOIOS TECNOLOGIA, 2019).

Na acústica não há muitos materiais desenvolvidos a partir da fibra de bananeira, Demarchi (2010) testou a absorção sonora do pseudocaule, Thilagavathi *et al.* (2010) construiu um TNT (tecido não tecido) que pode ser aplicado no interior veículos para controle de ruído e Tholkappiyan *et al.* (2016) determinou a absorção sonora da fibra misturada com papel picado.

No contexto da reutilização de materiais renováveis, este estudo propõe a verificação do potencial acústico da fibra extraída do pseudocaule da bananeira por meio da verificação do coeficiente de absorção sonora de amostras desenvolvidas com a fibra.

1.2 OBJETIVO

Investigar o potencial de absorção sonora da fibra extraída do pseudocaule da bananeira (*Musa spp.*) por meio da confecção de amostras desenvolvidas com a fibra e, também, propor uma aplicação para o material.

1.2.1 Objetivos específicos

Com o propósito de cumprir o objetivo geral, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Determinar os coeficientes de absorção sonora e o coeficiente de redução sonora (*noise reduction coefficient*, NRC) de amostras confeccionadas com a fibra de bananeira natural e sem a inserção de ligantes;
- Confeccionar amostras utilizando a fibra e uma cola natural fabricada a partir de uma de solução de água e polvilho e averiguar os coeficientes de absorção sonora e o NRC;
- Aplicar no interior de um painel pré-moldado, construído com gesso, as amostras confeccionadas somente com a fibra e, também, as fabricadas com a fibra de bananeira e a cola e verificar os seus coeficientes de absorção sonora, o NRC e a perda de transmissão;
- Validar um modelo numérico de um tubo de impedância desenvolvido no *software* ANSYS® *Workbench* inserindo como condição de contorno a impedância de algumas das amostras confeccionadas na metodologia experimental.

1.3 METODOLOGIA

Como forma de alcançar os objetivos propostos, a dissertação seguiu a metodologia contida no fluxograma apresentado na Figura 4.

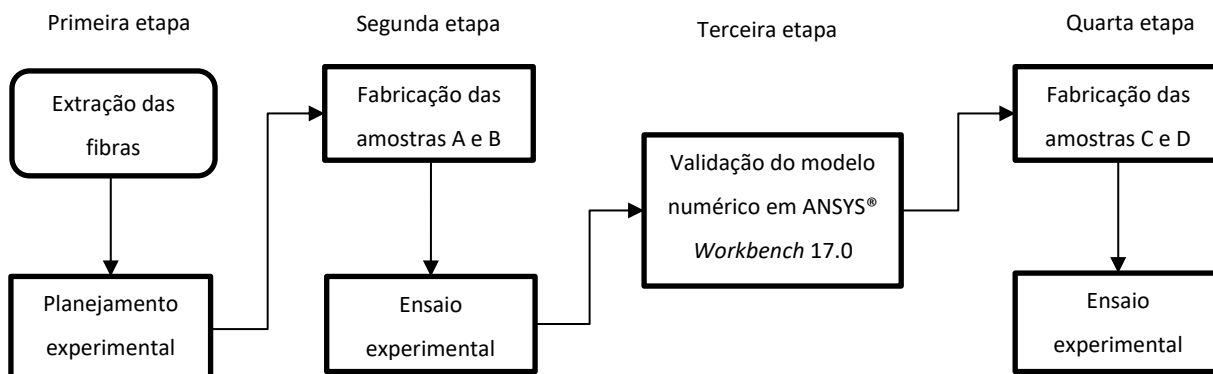


Figura 4 - Fluxograma da metodologia aplicada.

A primeira etapa do trabalho consistiu na extração manual das fibras do pseudocaule da bananeira *Musa* spp. Posteriormente à extração realizou-se o planejamento experimental, onde foram estabelecidos os comprimentos das fibras, as espessuras e densidades das amostras.

Na segunda etapa foram confeccionadas as amostras A (configuração 1), constituídas unicamente pela fibra natural e sem ligante. As amostras B (configuração 2) se apresentam como uma proposta de utilização das amostras A, onde foram construídos painéis sanduíches com a camada externa de gesso e a interna de fibra. Após desenvolvidas, as amostras foram submetidas ao ensaio experimental no tubo de impedância.

Na terceira etapa um modelo numérico de um tubo de impedância em método elementos finitos foi validado por meio da inserção, na extremidade oposta à fonte sonora, da impedância de uma amostra confeccionada no procedimento experimental. A análise conduzida no ANSYS® *Workbench* teve como resultado as pressões sonoras no ponto de inserção do microfone, posteriormente os valores foram processados no MATLAB®, obtendo-se os coeficientes de absorção sonora.

Após a validação do modelo numérico procedeu-se com a confecção das amostras C e D. As amostras C (configuração 3) foram fabricadas com fibra e cola natural fabricada com polvilho e água. As amostras D (configuração 4) apresentou-se como uma proposta de utilização das amostras C, onde foram desenvolvidas amostras no formato de painel sanduíche

com as camadas externas de gesso. Após a confecção das amostras realizou-se os ensaios no tubo de impedância.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em 7 capítulos. No capítulo 1 é apresentada uma introdução, onde discutiu-se os principais conceitos de conforto acústico, ruído e materiais acústicos sustentáveis. Além disso, aponta a motivação para a execução deste estudo, os objetivos e a metodologia adotada.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte, em formato cronológico, do desenvolvimento e criação de materiais acústicos sustentáveis indicando os tipos de materiais existentes, as matérias-primas utilizadas e os resultados alcançados.

A fundamentação teórica com as definições, formulações e normativas para a determinação do coeficiente de absorção sonora e a perda de transmissão sonora de materiais são demonstradas no capítulo 3.

O capítulo 4 contém o modo de extração da fibra de bananeira, o detalhamento das configurações adotadas e o modo de produção das amostras. Descreve, também, o procedimento experimental executado para a medição dos coeficientes de absorção e da perda de transmissão de cada amostra e, por fim, foi apresentada a metodologia numérica desenvolvida no *software* ANSYS® *Workbench*.

No capítulo 5 são apresentados os resultados adquiridos a partir da metodologia experimental e numérica, tais como os coeficientes de absorção sonora, o NRC, a perda de transmissão sonora e a interação entre os fatores adotados no planejamento experimental.

Por fim, o capítulo 6 traz as conclusões obtidas após o desenvolvimento e análise dos resultados.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir é apresentado, em ordem cronológica, o estado da arte acerca de materiais acústicos sustentáveis. Por meio desta revisão bibliográfica foi possível analisar o procedimento de preparação das amostras e mantas de fibras, bem como a influência da densidade, espessura da amostra, comprimento e espessura da fibra na atenuação do som. Sendo possível, então, determinar quais serão os processos de confecção, densidades e espessuras das amostras e o comprimento das fibras a serem adotados neste estudo.

A determinação das propriedades acústicas de materiais fibrosos iniciou-se com o estudo realizado por Delany *et al.* (1969), no qual foi determinado o coeficiente de absorção sonora da fibra de vidro e lã mineral por meio da resolução das equações que estabelecem a resistência do material a um fluxo de ar. Porém, a pesquisa por materiais que utilizassem substâncias naturais surgiu com a pesquisa de Santos *et al.* (1992), onde os autores analisaram o desempenho acústico de blocos cerâmicos com a adição de cascas de arroz com 2, 3 e 4 cm, e, também, comparou a absorção sonora de embalagens de ovos e o papelão. Com a finalização da pesquisa, os autores concluíram que os materiais desenvolvidos apresentaram bom potencial para ser utilizados como absorvedores acústico.

Dentro do contexto de materiais naturais, a lã de ovelha (Figura 5) é um utensílio usualmente empregado para a fabricação de cobertores, sapatos, tapetes, roupas e outros. A investigação das propriedades acústicas do material foi realizada por Ballagh (1996), que verificou, utilizando um tubo de impedância, o coeficiente de absorção sonora de diferentes amostras com as espessuras de 6 a 150 mm, e com o tamanho da fibra variando entre 22 e 35 μm . Com o fim da pesquisa percebeu-se que todas as amostras apresentaram bons coeficientes de absorção sonora em altas frequências.



Figura 5 - Lã de ovelha (ZACH *et al.*, 2012)

No mesmo ano, Wassilieff (1996) apresentou a absorção sonora de amostras de 24, 25, 50 e 75 mm desenvolvidas com a reutilização de sobras de madeiras empregadas na construção de MDF e, também, comparou o coeficiente de absorção sonora de uma amostra de 9 mm, coletando os dados experimentais após a criação, e após 2 anos de armazenada. Ao fim das análises o autor constatou que a absorção sonora do material diminuiu após dois anos de armazenamento.

Berardi e Iannace (2015) também determinou o coeficiente de absorção sonora de duas amostras de madeira, sendo uma com 6 cm de espessura e 100 kg/m^3 e constituída de fibra natural (Figura 6 (a)), e a outra com madeira mineralizada (Figura 6 (b)), possuindo 3 cm de espessura e 260 kg/m^3 . Ao fim do estudo o autor concluiu que a amostra de fibra de madeira apresentou melhor desempenho de absorção sonora.

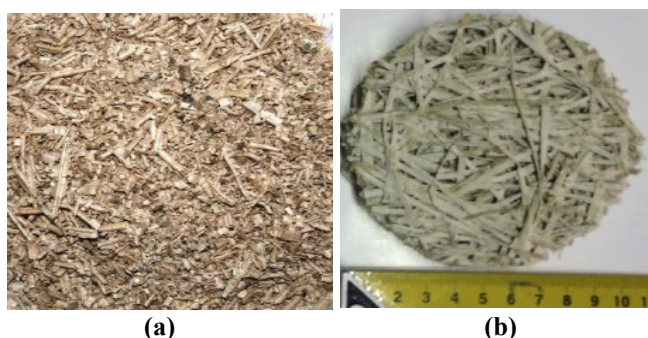


Figura 6 - Amostras com madeira: (a) fibra natural (b) mineralizada (BERARDI E IANNACE, 2015).

Pfretzschner e Rodriguez (1999) sugeriu um método do reaproveitamento de pneus, material que, frequentemente, é descartado na natureza após a vida útil gerando danos ambientais. Os autores determinaram os coeficientes de absorção sonora de 9 amostras com a adoção de diferentes espessuras de amostras e grãos, o que pode ser verificado na Tabela 1. Ao fim do procedimento verificou-se que todas as amostras apresentaram bons resultados de

absorção sonora, podendo o material, segundo os autores, ser empregado em barreiras acústicas, como forma de diminuir o ruído ocasionado por tráfego automotivo.

Tabela 1 - Amostras confeccionadas e estudadas por Pfretzchner e Rodriguez (1999).

Amostra	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
Espessura da amostra (cm)	9	2,5, 5 e 9	9	9	9	9	9
Espessura dos Grãos (mm)	< 1,4	< 3,5	$1 < \varnothing < 3$	$3 < \varnothing < 5$	3,5	$5 < \varnothing < 7$	7

Fonte: Pfretzchner e Rodriguez (1999).

Koizumi *et al.* (2002) analisaram as características de absorção sonora da fibra de bambu operando um tubo de impedância. Para isto, criou-se amostras com 25, 50 e 75 mm de espessura e tendo as fibras de bambu tamanhos entre 90 e 125 μm , 125 e 210 μm , 210 e 425 μm , para cada espessura citada anteriormente, respectivamente. Além disso, os autores analisaram a influência da densidade da fibra na absorção sonora e, como método de verificação dos resultados, comparou-se os coeficientes de absorção obtidos no experimento com os coeficientes da fibra de vidro. Ao fim dos experimentos percebeu-se que as amostras apresentaram bom desempenho acústico e que a fibra de bambu demonstrou resultados similares ao da fibra de vidro.

Sá (2014) também verificou as propriedades acústicas de um material confeccionado com a fibra de bambu. Para a análise o autor confeccionou um painel de bambu laminado colado (BaLC) de retirou-se 36 amostras com 4 mm de espessura e com diferentes densidades, entre 0,57 e 0,74 g/cm^3 (Figura 7). Verificou-se o desempenho das amostras com distintas configurações: (a) 25, 50, 75 e 100 mm de espessura de cavidade de ar interna, (b) sem cavidade interna e (c) com a cavidade com 50, 75 e 100 mm e preenchida com lã de vidro 50 mm. Os ensaios foram realizados operando-se uma câmara reverberante. Por meio dos resultados verificou-se que as amostras demonstraram potencial de absorção sonora nas bandas de frequências de 80 a 200 Hz, tendo obtido, com a amostra com a cavidade de 50 mm e com a inserção da lã de vidro, o maior coeficiente de absorção sonora, sendo de aproximadamente 0,8 em 100 Hz.



Figura 7 - Amostras de bambu laminado colado (SÁ, 2014).

Após alguns anos, Outa *et al.* (2017) também determinaram o coeficiente de absorção acústica da fibra de bambu (Figura 8 (a)). Para isto, os autores desenvolveram uma amostra com 20 mm de espessura e com as fibras possuindo 150 mm de comprimento (Figura 8 (b)). Ao fim da análise percebe-se, por meio dos coeficientes de absorção sonora obtidos pelo tubo de impedância, que o material estudado não possui boa absorção sonora, visto que o maior coeficiente encontrado é de aproximadamente 0,19 em 500 Hz.

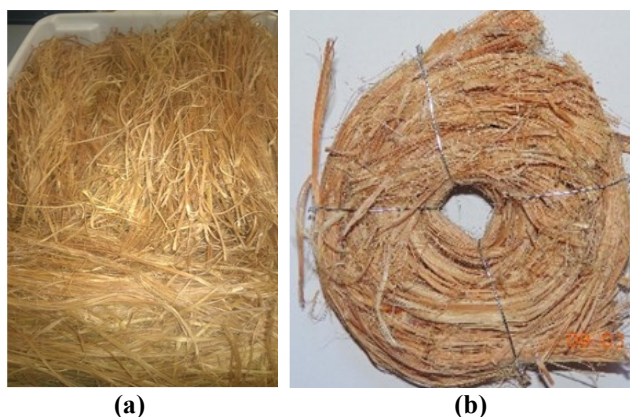


Figura 8 - Bambu: (a) fibra alongada mercerizada (b) amostra construída com a fibra (OUTA *et al.*, 2017).

Prosseguindo com o estudo utilizando a fibra de bambu, Páez *et al.* (2020) verificou, no tubo de impedância, a absorção sonora de 12 amostras circulares (Figura 9 (a)) com 2,54 cm de espessura fabricadas com a fibra. Além disso, os autores confeccionaram um painel com 0,5 cm de espessura e 1,20 m² que foi submetido ao ensaio em uma câmara reverberante (Figura 9 (b)). De 250 a 1000 Hz as amostras cilíndricas apresentaram coeficientes de absorção sonora variando de 0,4 a 0,5, entretanto, em 2000 Hz as amostras apresentaram um coeficiente de 0,7.

O painel fabricado apresentou boa absorção sonora na faixa de frequência de 400 a 630 Hz, chegando ao coeficiente de 0,75 em 500 Hz.



Figura 9 - Amostras de fibra de bambu: (a) para ensaio no tubo de impedância (b) ensaio na câmara reverberante (PÁEZ *et al.*, 2007).

Nor *et al.* (2004) determinou a absorção sonora de duas amostras construídas com fibra de coco. Os autores simularam uma amostra do material com 20 mm de espessura e 74 kg/m^3 . Foram realizadas 3 simulações: na primeira, verificou-se o coeficiente de absorção sonora do material disposto diretamente ao lado de uma parede rígida e, posteriormente, considerou-se que o mesmo material estivesse a 50 mm da parede. Na segunda simulação a manta de fibra de coco foi revestida com um painel micro perfurado de alumínio com 1 mm de espessura. Os valores foram comparados com os obtidos para a amostra sem revestimento inserida ao lado da parede rígida, experimento desenvolvido na primeira simulação. Na terceira simulação, foram considerados 6 casos, os 3 primeiros são compostos somente pela placa de fibra de coco, sendo que, o caso 1 apresenta um espaço com ar entre a placa e uma parede rígida, o caso 2 é formado por duas placas com um espaço de ar entre as placas e a parede rígida, o 3 é constituído por 3 placas com espaços entre cada uma delas, nos casos 4, 5, 6, umas das placas foi revestida por um painel micro perfurado de alumínio e seguem as configurações dos casos 1, 2 e 3, respectivamente. A Figura 10 apresenta os seis casos estudados na terceira simulação.

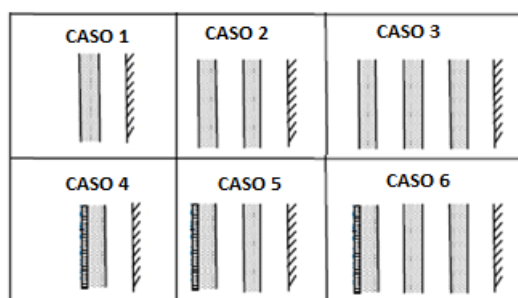


Figura 10 - Casos estudados por NOR *et al.* (2004).

Após as simulações realizadas por Nor *et al.* (2004), é possível concluir que o espaço de ar entre as amostras e a parede rígida melhorou a absorção de som, quando comparado com os valores dos coeficientes de absorção da amostra localizada junto à parede rígida. As amostras revestidas com o painel micro perfurado de alumínio tiveram bons resultados em baixas e médias frequências (coeficiente de absorção de aproximadamente 0,9 em 1250 Hz), porém, em altas frequências, os valores apresentaram rápido declínio, levando a constatação de que este material tem bom desempenho acústico em baixas e médias frequências.

Vieira (2008) caracterizou as propriedades acústicas de 6 painéis confeccionados com fibra de coco com diferentes densidades (18 a 130 kg/m³) e espessuras (0,05 a 0,10 m). Os tamanhos das fibras empregadas na construção das mantas não foram mencionados. Para a determinação do coeficiente de absorção sonora, utilizando um tubo de impedância, foram retiradas 3 amostras cilíndricas de cada painel, totalizando 18 amostras, a Figura 11 (a) apresenta os materiais testados no experimento. Para a metodologia experimental, manipulando uma minicâmara reverberante, foram usadas 18 amostras retangulares com dimensões de 0,60 x 0,50 m (Figura 11 (b)). Analisando os resultados dos experimentos percebe-se que as amostras com 130 kg/m³ e 0,10 m submetidas ao ensaio no tubo de impedância demonstraram os melhores resultados, tendo como coeficiente de absorção sonora, em 4600 Hz, aproximadamente 0,98. Com a minicâmara reverberante, as amostras com 18 kg/m³ com as espessuras de 0,05 e 0,10 m e a com 60 kg/m³ e 0,05 m apresentaram baixos resultados na faixa de frequência de 0 a 8000 Hz, o restante das amostras apresentaram bons resultados em médias e altas frequências.



(b) (b)
Figura 11 - Amostras de fibra de coco: (a) para ensaio no tubo de impedância (b) para ensaio na minicâmara reverberante (VIEIRA, 2008).

Seguindo o contexto da construção de materiais acústicos sustentáveis a partir do coco, Zulkifli *et al.* (2010) desenvolveram painéis com a fibra adicionando látex e, posteriormente, para a criação da amostra, inseriu-se uma camada superior de um painel perfurado construído com zinco. Para os ensaios foram desenvolvidas amostras com 100 mm e 28 mm de diâmetro (Figura 12). A metodologia experimental foi conduzida com a operação do tubo de impedância. Foram coletados os resultados das amostras com e sem a adição do painel perfurado. A partir dos coeficientes de absorção sonora obtidos com o experimento os autores concluíram que na faixa de frequência de 600 a 2400 Hz a amostra com o painel perfurado demonstrou melhores valores, entretanto, na faixa de frequência de 2400 a 4100 Hz a amostra sem a inserção do painel perfurado demonstrou resultados superiores.



Figura 12 - Amostras de fibra de coco desenvolvida por Zulkifli *et al.* (2010).

Após alguns anos, Cunha (2012) estudou as propriedades acústicas de compósitos desenvolvidos com gesso e fibra de coco. Para isso, foram construídas duas mantas com a fibra e com as espessuras de 8 e 10 mm, tendo cada uma 223,40 e 279,30 g, respectivamente. As placas a serem utilizadas nos experimentos foram confeccionadas em formato de painéis sanduíches, onde as camadas externas foram constituídas por gesso e a camada interna pela

manta de fibra de coco, construiu-se placas com 500 x 500 x 24 mm. Confeccionou-se 3 amostras, a amostra 1 é constituída somente por gesso, a 2 por gesso e a manta de fibra de coco com 8 mm de espessura e a 3 por gesso e a manta de fibra de coco com 10 mm. Para a determinação do coeficiente de absorção sonora utilizou-se um tubo de impedância. Após a análise dos resultados percebe-se que na faixa de frequências de 102,28 a 1110 Hz as amostras com a fibra de coco apresentaram melhores resultados, porém, acima de 1200 Hz, a amostra composta somente por gesso teve coeficientes de absorção sonora superiores.

D'Alessandro e Pispola (2005) verificaram as propriedades acústicas do cânhamo, a fibra desse material (Figura 13) é usada para diversas finalidades, entre elas a produção de papel, algodão e outros. Foram confeccionadas amostras com 50 mm de espessura, 30 kg/m³ de densidade e constituídas de fibra de cânhamo e poliéster. Os testes foram realizados em uma câmara reverberante. Ao fim dos ensaios constatou-se que a fibra de cânhamo apresentou resultados inferiores as amostras de lã de vidro (material frequentemente empregado no mercado para a absorção de sons), porém, a fibra de cânhamo apresentou bons resultados na faixa de frequência de 630 a 5000 Hz, chegando a 0,91 na frequência de 1000 Hz.



Figura 13 - Fibra de cânhamo (D'ALESSANDRO e PISPOLA, 2005).

Seguindo o estudo com Cânhamo, Glé *et al.* (2011) verificaram o coeficiente de absorção sonora de amostras cilíndricas com diferentes espessuras da fibra, para isto, foram construídas 3 amostras (S1, S2 e S3) cada uma com a fibra possuindo 9, 8 ou 5 mm de comprimento (Figura 14 (a)) e contendo adição de um aglutinante a base de cal. De forma análoga, Saad e Kamal (2013) determinaram a absorção de som de amostras (Figura 14 (b)) construídas com cânhamo utilizando a fibra triturada com tamanhos entre 2 a 3 mm e adotando como aglutinante a resina de uréia-formaldeído. Também com a fibra de cânhamo Berardi e Iannace (2015) analisaram a absorção sonora de 3 amostras, tendo uma 4 cm de espessura e 100 kg/m³ de densidade, e as outras duas com 6 cm e densidade de 50 e 100 kg/m³, nesta pesquisa

não foi indicada a aplicação de aglomerante. Ao analisar os resultados de Glé *et al.* (2011), Saad e Kamal (2013) e Berardi e Iannace (2015) conclui-se que em média e altas frequências o material, em todas espessuras estudadas, possui bons valores de absorção sonora, tendo as amostras S1, S2 e S3, de Glé *et al.* (2011), chegado a 1 (absorveu todo o som incidente) em 1800 Hz e, também, a amostra com 6 cm e 50 kg/m³, de Berardi e Iannace (2015), atingido aproximadamente 1 na faixa de frequência de 1000 a 1400 Hz (2015).



Figura 14 - Canhamo: (a) diferentes espessuras estudadas por Glé *et al.* (2011) (b) amostras para o ensaio no tubo de impedância confeccionada por Saad e Kamal (2013).

De modo distinto aos trabalhos apresentados com cânhamo, e no mesmo ano da pesquisa de Berardi e Iannace (2015), Le *et al.* (2015) determinaram o coeficiente de absorção sonora de 2 amostras desenvolvidas com a fibra de cânhamo e amido de trigo, sendo a primeira com o tamanho das fibras variando entre 0-15 mm e a segunda entre 0-20 mm. Os resultados foram coletados após 6, 8, 10, 12 e 14 dias de criação das amostras. Sambu *et al.* (2016) criaram amostras com 5 cm de espessura (Figura 15) e constituídas por fibra de cânhamo com adição de 20%, 30% e 40% de borracha natural. Com a análise dos resultados dos estudos apresentados conclui-se que, os materiais criados por Le *et al.* (2015) e Sambu *et al.* (2016) apresentaram bons coeficientes de absorção sonora em médias e altas frequências, tendo a amostra apresentada no primeiro estudo, com a composição de 0-15 mm e após 6 dias da criação, um coeficiente de 0,78 em 1800 Hz e a amostra com 20% de borracha natural confeccionada pelos autores do segundo estudo o coeficiente próximo a 1 em 900 Hz.



Figura 15 - Amostra de cânhamo com adição de borracha natural (SAMBU, 2016).

O trabalho de Azevedo e Nabuco (2005) apresenta a utilização da fibra de sisal como um material absorvedor acústico. O coeficiente de absorção sonora foi obtido pelo tubo de impedância. Para isto, confeccionou-se uma amostra com 50 mm de espessura constituída de fibra de sisal sem processamento (Figura 16 (a)) e, também, de um tapete com 6 mm de espessura onde a matéria-prima principal é o sisal. Posteriormente, desenvolveu-se painéis de 600 mm x 1200 mm com 25 mm e 50 mm de espessura e densidade de 140 kg/m³ (Figura 16 (b)). Os coeficientes de absorção sonora obtidos no experimento foram comparados com os resultados da fibra sem processamento. Ao fim da análise percebeu-se que o sisal, em frequências maiores que 800 Hz, possui o coeficiente de absorção sonora superior a 0,8, podendo chegar a até 0,99.

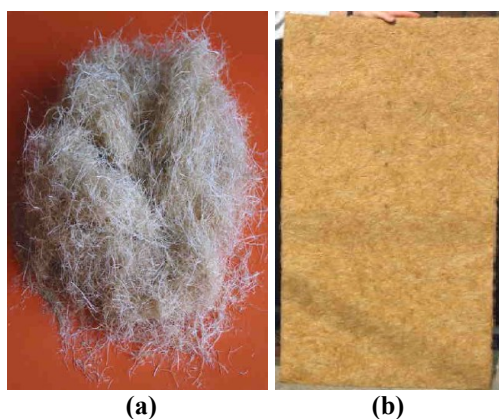


Figura 16 - Fibra de sisal: (a) sem processamento (b) painel (AZEVEDO e NABUCO, 2005).

Entre as diversas possibilidades para a reutilização da fibra da palha seca (Figura 17 (a)) há o emprego para a construção de materiais com boas propriedades de absorção sonora. Com esse intuito, Abdullah *et al.* (2011) criaram amostras (Figura 17 (b)) com a fibra e verificou o seu coeficiente de absorção sonora operando um tubo de impedância. Os autores construíram 2 amostras com espessura de 33 mm, com os tamanhos das fibras variando de 1 a 3 mm. Na

composição das amostras utilizou-se diferentes proporções de metilcelulose, composto utilizado como aglutinante para as fibras. A relação entre o aglutinante colocado nas amostras 1 e 2, foi de 1:1,6, respectivamente. Como resultado da análise, constatou-se que o aumento da quantidade de metilcelulose (amostra 2) melhora as propriedades acústicas da fibra em baixas frequências, porém, em altas frequências, a absorção sonora diminui.



Figura 17 - Palha seca: (a) fibra (b) amostra construída a partir da fibra (ABDULHAH *et al.*, 2011).

Fatima e Mohanty (2011) verificaram o coeficiente de absorção sonora e a perda de transmissão da fibra de juta sem tratamento. Primeiramente, os autores verificaram a absorção sonora de amostras com 25,4 e 50,8 mm desenvolvidas somente com a fibra (Figura 18 (a)) e, posteriormente, foi verificada a perda de transmissão das placas de 50 mm construídas com a fibra e diferentes quantidades de adição de látex (Figura 18 (b)). De posse dos resultados, os autores concluíram que a amostra de 50,8 mm demonstrou boa absorção sonora e a com 5% de látex obteve boa perda de transmissão sonora.



Figura 18 - Juta: (a) fibra (b) fibra com adição de latex (FATIMA e MOHANTY, 2011).

Iannace *et al.* (2012) apresentaram as características acústicas de uma sala de aula com placas confeccionadas com juncos gigantes, a criação e inserção do material na universidade teve como finalidade a melhoria da qualidade acústica do ambiente para os alunos. Para o desenvolvimento da placa os juncos gigantes (Figura 19 (a)) foram cortados com espessura de aproximadamente 3 mm (Figura 19 (b)), secados e esmagados, e, posteriormente, os grãos

foram armazenados em sacos (Figura 19 (c)). Os sacos foram inseridos em uma moldura de madeira e embrulhados com tecidos de juta (Figura 19 (d)) e, então, foram posicionados na sala de aula (Figura 19 (e)). Após a inserção das placas os autores concluíram que o tempo de reverberação do som diminuiu, indicando que o material utilizado é eficaz na absorção do som.

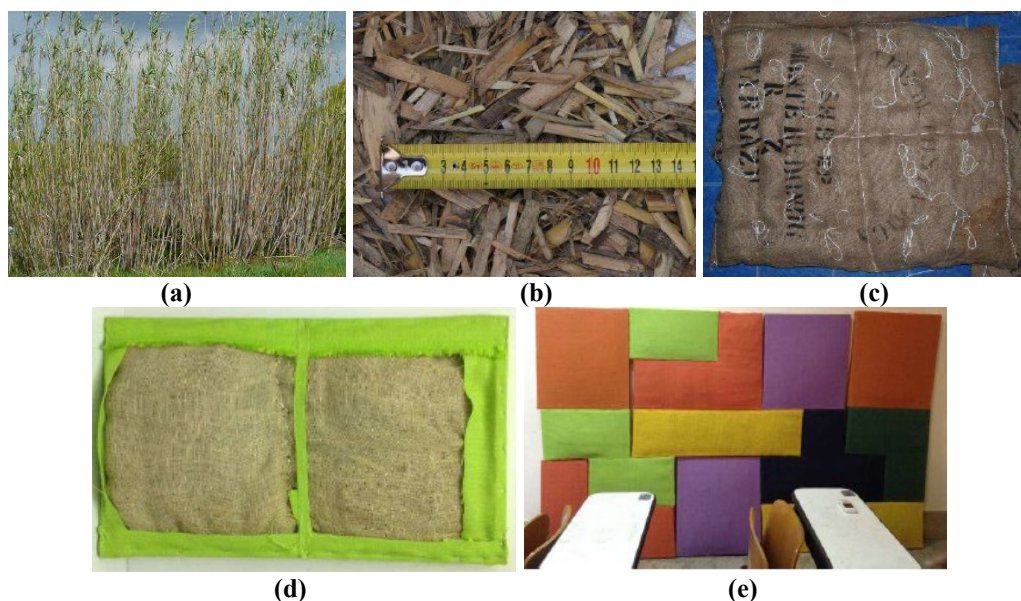


Figura 19 - Juncos gigantes: (a) arvores (b) triturados (c) grãos armazenados em sacos (d) material emoldurado (e) aplicação da placa (IANNACE *et al.*, 2012).

O estudo de Ekici *et al.* (2012) analisou as propriedades acústicas da luffa (Figura 20 (a)). Para isto, os autores construíram amostras de 20 mm de espessura por meio do corte do material liso e sem processamento (Figura 20 (b)). Depois, criou-se uma nova amostra de 20 mm de espessura contendo a fibra de luffa, polioli e isocianato (Figura 20 (c)). Com a conclusão do estudo verificou-se que a luffa, em baixas frequências, não possui boa absorção sonora. Porém, em altas frequências, o seu coeficiente de absorção sonora pode chegar a aproximadamente 0,5, o que pode ser uma contribuição para o conforto acústico de ambientes. A mistura de luffa com polioli e isociano apresenta-se como uma ótima opção para a absorção sonora, pois o coeficiente de absorção do material possui bons resultados em uma ampla faixa de frequência (500 – 6300 Hz), podendo chegar a até 0,9 em 2500 Hz.

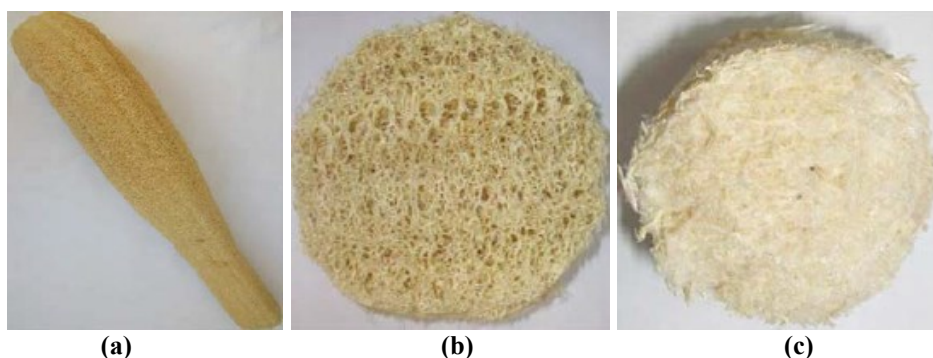


Figura 20 - Luffa: (a) fibra (b) fibra cortada para o ensaio (c) fibra com adição de Poliál e Isocianato (EKICI *et al.*, 2012).

A principal fonte de açúcar no Brasil provém da cana de açúcar, a fibra desta planta também é empregada na fabricação de artesanatos e alimentos. Putra *et al.* (2012) verificaram o potencial de absorção sonora da fibra da cana de açúcar construindo amostras do material com aproximadamente 13 cm de espessura e com a adição de poliuretano e, posteriormente, poliéster. A proporção entre a fibra e os ligantes foram de: 90:10, 80:20, 70:30 e 60:40. Na construção da amostra a fibra cortada em tamanhos entre 5 e 10 mm de comprimento foi misturada com os ligantes e prensada a quente. Conforme os resultados apresentados consta-se que, a adição de poliuretano e poliéster gerou resultados semelhantes, chegando a aproximadamente 0,8 em 4500 Hz.

Dando prosseguimento ao estudo com a cana de açúcar, Outa (2014) verificou as características absorptivas da fibra com a adição de cola branca e cola sintética. O procedimento utilizado para a preparação da fibra foi o seguinte: o caldo da cana foi extraído, o bagaço foi lavado e secado naturalmente por tempo indeterminado pelo autor, posteriormente, extraiu-se a fibra pelo desfibradora, e, para a determinação do tamanho da fibra utilizou-se peneira com abertura de aproximadamente 0,70 mm (malha24) e 1,68 mm (malha12). Foram construídas 5 amostras, a Tabela 2 apresenta a quantidade de material adicionado em cada amostra.

Tabela 2 - Materiais utilizados para a construção das amostras de Outa (2014).

Amostra	Malha	Tipo de cola	Quantidade de cola (g)	Fibra da cana (g)
1	24	Sintética	0,4	50
2	24	Sintética	0,2	50
3	24	Branca	0,5	50
4	12	Branca	0,5	50
5	12 e 24	Branca	0,5	50

Fonte: Outa (2014).

A mistura que constitui cada amostra desenvolvida por Outa (2014) foi inserida em um molde cilíndrico com o mesmo diâmetro do tubo de impedância manipulado no experimento (100 mm). Após o molde, levou-se as amostras ao forno para secagem por 24 horas a 120 °C. A Figura 21 (a), (b) e (c) apresenta as amostras 3, 4 e 5, respectivamente. Após obter as amostras, procedeu-se com a metodologia experimental. Ao fim da análise foi constatado que a cana de açúcar com adição de cola branca e cola sintética não possui bons coeficientes de absorção sonora, os melhores resultados foram os da amostra 2, tendo o coeficiente de absorção sonora igual a 0,38 em 500 Hz.

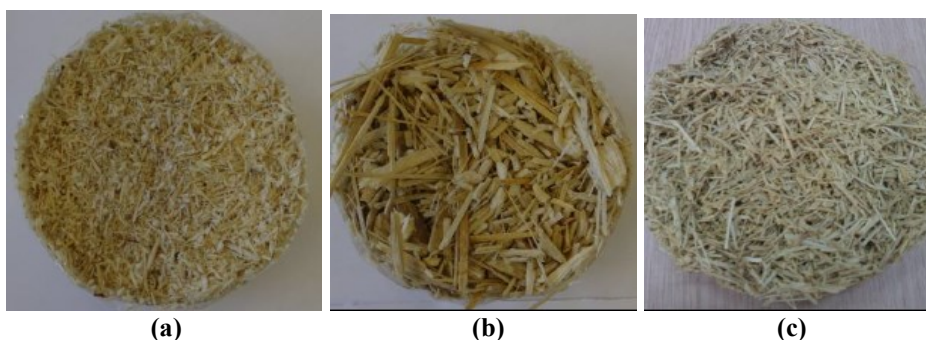


Figura 21 - Amostras construídas com 50 g de fibra de cana e 0,5 g de cola branca, fibra com tamanhos de aproximadamente: (a) 0,70 mm (b) 1,68 mm (c) 0,70 e 1,68 mm (OUTA, 2014).

Outa *et al.* (2017) analisaram a absorção acústica da fibra de cana alongada mercerizada (Figura 22 (a)). Para o experimento utilizou-se um tubo de impedância, nele inseriu-se uma amostra com 20 mm de espessura sendo constituída, unicamente, pela fibra de cana com 150 mm de comprimento (Figura 22 (b)). Após a determinação do coeficiente de absorção sonora da amostra conclui-se que a cana de açúcar, sem adição de aglomerantes, não possui bons resultados de absorção sonora, pois o melhor valor encontrado está em 500 Hz sendo aproximadamente 0,21.

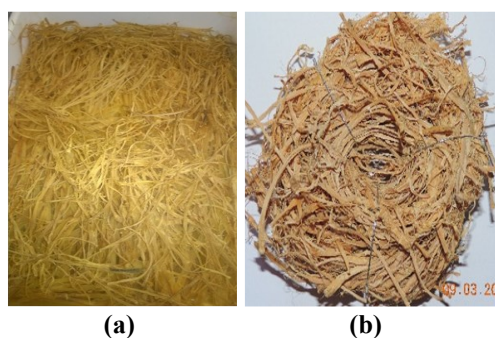


Figura 22 - Cana de açúcar: (a) fibra alongada mercerizada (b) amostra construída a partir da fibra (OUTA *et al.*, 2017).

Veerakumar e Selvakumar (2012) analisaram as propriedades de absorção acústica da kapok com a adição de polipropileno. Os autores desenvolveram 6 amostras, onde a amostra 1 e 4 possuem 30% de kapok e 70% de polipropileno, as amostras 2 e 5 possuem 40% de kapok e 60% de polipropileno e as amostras 3 e 6 possuem 50% de cada material. Além disso, as amostras 4, 5 e 6 foram comprimidas com um peso de 33,33 kg/m². Gerou-se os resultados para cada amostra desenvolvida considerando a ausência e presença do ar no seu interior. Ao fim da análise constatou-se que as amostras sem compressão apresentaram coeficientes de absorção sonora superiores as que foram comprimidas.

Nesse mesmo contexto, Xiang *et al.* (2013) determinaram o coeficiente de absorção sonora de amostras de kapok (Figura 23) variando a espessura (20 e 40 mm) e densidade (5 a 30 kg/m³). Construiu-se amostras com e sem compressão. Após a metodologia experimental, os autores concluíram que, em baixas frequências (125 a 250 Hz), as amostras com e sem compressão possuem baixos coeficientes de absorção (0,059 a 0,204). Porém, em altas frequências (2000 a 4000 Hz), a espessura de 40 mm com as densidades de 5 e 10 kg/m³ demonstraram melhores resultados do que as de 20 mm, chegando a até 0,977, e, com as densidades de 15 e 20 kg/m³ a espessura de 20 mm obteve resultados superiores, alcançando até 0,997.



Figura 23 - Kapok (XIANG *et al.*, 2013)

Tiuc e Vasile (2014) analisaram a viabilidade acústica da reutilização de borracha com a adição de cortiça, resíduos de tecido e serragem de pinheiro. Os pesquisadores construíram 5 amostras (Figura 24), sendo todas constituídas por uma camada de borracha (com tamanhos entre 1 a 3 mm) e Poliuretano. A distinção entre cada amostra é pela adição de camadas de: cortiça na primeira amostra; resíduos de tecido na segunda; serragem de pinheiro na terceira; serragem de pinheiro e uma camada de resíduo de tecido na quarta e serragem de pinheiro e uma camada de cortiça na quinta. Ao fim do procedimento experimental constatou-se que todas as amostras construídas possuem boa absorção sonora em uma ampla faixa de frequência.



Figura 24 - Amostras para a determinação do coeficiente de absorção sonora (TIUC e VASILE, 2014).

Dentro do contexto de materiais sustentáveis Ricciardi *et al.* (2014) estudou as propriedades acústicas de painéis construídos com a mistura de diferentes tipos de papeis reciclados e, como aglutinante, utilizou-se diversos tipos de cola. Os autores construíram 2 painéis em formato de sanduíche, nomeados de N7 e N15, ambos os painéis tem as camadas externas confeccionadas com polietileno possuindo 2,5 mm de espessura cada. A camada interna é constituída de papéis e cola, a distinção entre as amostras está na espessura da camada interna, tendo a amostra N7 7 mm de espessura e a N15 15 mm. A Figura 25 (a) e (b) apresenta uma ilustração da constituição e dimensão de cada amostra estudada pelos autores. Após a conclusão do estudo os autores constataram que a amostra com maior potencial de absorção sonora foi a N15, tendo o coeficiente de absorção sonora máximo 0,46 em 1500 Hz.

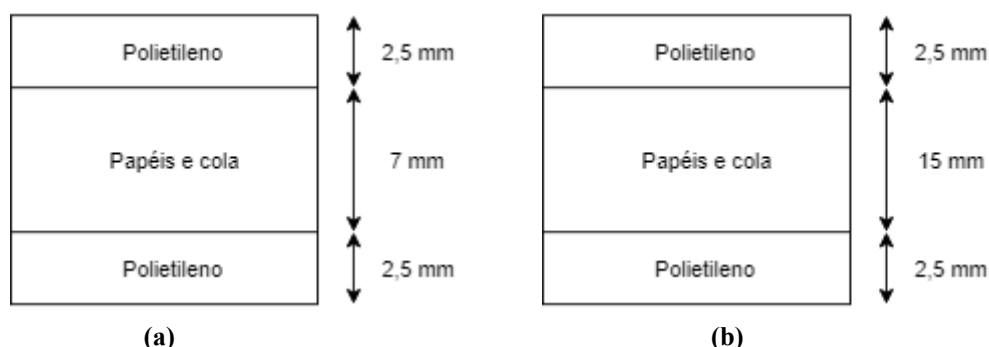


Figura 25 - Características das amostras estudadas por Ricciardi *et al.* (2014): (a) amostra N7 (b) amostra N15.

A cortiça é um material natural extraído da casca do sobreiro, a sua aplicação é bastante variada, tendo como exemplos: a construção de rolhas, artesanatos, calçados, etc. A propriedade de absorção sonora desse material foi analisada por Berardi e Iannace (2015), para isto, os autores construíram uma amostra de 3 cm de espessura com pedaços do material, como pode ser verificado na Figura 26. No mesmo ano Iasnicu *et al.* (2015) verificaram a absorção sonora de duas amostras desenvolvidas com a cortiça, a primeira possui grãos de 10 mm e a segunda de 3 mm. Ao fim da metodologia experimental percebe-se que, de acordo com os resultados encontrados em ambos os estudos, a cortiça possui bons resultados em altas frequências, sendo que, no primeiro estudo mencionado, nas frequências acima de 1400 Hz o coeficiente chegou a aproximadamente 0,9 e, na segunda pesquisa, a amostra onde as fibras possuem 10 mm de espessura apresentou os melhores resultados, tendo alcançado 0,81 em 3150 Hz.



Figura 26 - Amostras de cortiça com 3 cm de espessura (BERARDI e IANNACE, 2015).

A propriedade de absorção sonora da fibra do mesocarpo da palmeira (Figura 27 (a)) foi analisada por Latif *et al.* (2015), para o experimento os autores desenvolveram amostras com a fibra tendo 10, 20, 30 ou 40 mm de espessura (Figura 27 (b)). Seguindo o estudo com a fibra de palmeira Belakroum *et al.* (2017) estudaram a absorção sonora dos pecíolos e da fibra

localizada entre eles, para isto, os autores construíram amostras com 30 mm de espessura e utilizou como aglutinante 25% de amido e 85% de água. Assim, a composição das amostras é formada por 20% do material, 68% de água e 12% de amido. A determinação do coeficiente de absorção sonora em ambos os estudos citados foi realizada no tubo de impedância com amostras de 28 e 100 mm de espessura. Com os estudos de Latif *et al.* (2015) conclui-se que a fibra de palmeira, com espessuras maiores que 20 mm, apresenta bons resultados em média e alta frequência, sendo que o melhor coeficiente de absorção foi obtido com a fibra de 40 mm, chegando a 0,91 em 5000 Hz. Igualmente, os resultados de Belakroum *et al.* (2017), demonstraram bons coeficientes de absorção sonora em médias e altas frequências.



Figura 27 -- Mesocarpo da Palmeira: (a) fibra (b) amostra construída a partir da fibra (LATIF *et al.*, 2015).

Iannace (2017) determinou o coeficiente de absorção sonora de diversos materiais naturais, entre eles o feno - gramínea destinada a alimentação de gado -. O autor confeccionou 3 amostras sem adição de aglutinantes, tendo cada uma 60, 80 e 120 mm de espessura. Por meio da determinação da absorção sonora do material utilizando o tubo de impedância constatou-se que a amostra com 60 mm apresentou baixo coeficiente de absorção até aproximadamente 1400 Hz, porém, na faixa de frequência de 1400 a 2000 Hz, houve um aumento nos coeficientes, chegando a 0,6. Os melhores resultados foram os obtidos com a amostra de 120 mm, tendo esta espessura o coeficiente de 0,8 em 1550 Hz.

Karaky *et al.* (2019) analisaram a capacidade de absorção sonora da polpa de beterraba desidratada (Figura 28 (a)) com a adição de amido de batata. Foram construídas amostras com 5 cm de espessura (Figura 28 (b)) com as proporções de 10, 20, 30 e 40% de amido. O coeficiente de absorção sonora foi obtido operando-se o tubo de impedância, e, pela análise dos resultados, conclui-se que as amostras com 20 e 30% de amido na faixa de frequência de 270 a

700 Hz absorveu até 70% do som e, a amostra com 10% de amido teve bom desempenho na faixa de frequência de 700 a 1000 Hz, absorvendo aproximadamente 75% do som.



Figura 28 - Polpa de beterraba desidratada: (a) partículas entre 8 a 10 mm (b) amostra confeccionada com as partículas e amido de batata (KARAKY *et al.*, 2019).

A capacidade de absorver som da fibra da yucca (Figura 29 (a)) foi verificada por Soltani *et al.* (2020). Os autores confeccionaram duas amostras com 30 e 100 mm de diâmetro e 15 mm de espessura, e outras duas com os mesmos diâmetros e 30 mm de espessura (Figura 29 (b)). Após a conclusão dos experimentos percebeu-se que a amostra de 15 mm de espessura demonstrou baixa absorção sonora até 2000 Hz, entretanto na faixa de frequência de 2000 a 5000 Hz a amostra apresentou bons resultados, chegando a 0,95 em 4000 Hz. No entanto, a amostra de 30 mm de espessura demonstrou bons resultados na faixa de frequência de 1500 a 6300 Hz, chegando 0,95 em 2500 Hz.



Figura 29 - Yucca: (a) planta (b) amostras de 30 mm de espessura confeccionadas com a fibra (SOLTANI *et al.*, 2020).

Gadea *et al.* (2020) estudaram as propriedades acústicas das sementes de azeitona (Figura 30 (a)), cereja (Figura 30 (b)), damasco (Figura 30 (c)) e pêssgo (Figura 30 (d)). Para

a confecção das amostras utilizou-se moldes cilíndricos com 100 mm de diâmetro interno e, para a junção das sementes, foi empregada uma pequena quantidade de adesivo cianoacrilato. Com cada tipo de semente foram desenvolvidas 5 amostras com diferentes espessuras. A partir dos resultados obtidos pelos autores percebe-se que as amostras de azeitona e cereja demonstraram melhor potencial de absorção sonora com a espessura de 77 mm, tendo obtido o coeficiente de 0,76 em 725 Hz e 0,88 em 796, respectivamente. Com a amostra de damasco a absorção sonora máxima foi de 0,94 em 1000 Hz com a espessura de 55 mm, entretanto, com a amostra de pêssgo, a espessura de 35 mm obteve o maior coeficiente de absorção sonora, sendo de 0,74 em 1600 Hz.

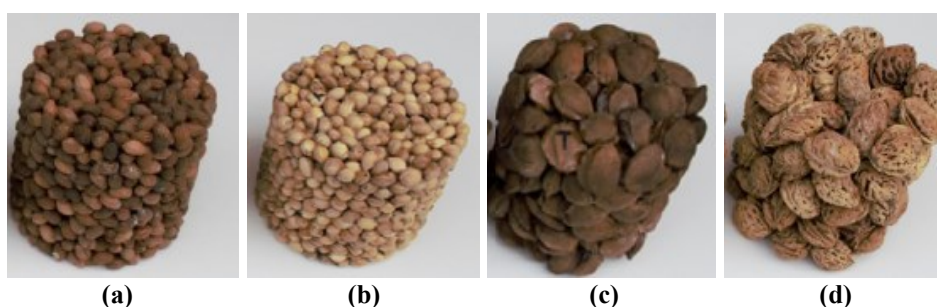


Figura 30 - Amostras de semente: (a) azeitona (b) cereja (c) damasco (d) pêssgo (GADEA, *et al.*, 2020).

2.1 FIBRA DE BANANEIRA

A verificação das propriedades acústicas da bananeira teve como princípio o estudo realizado por Demarchi (2010). Para tal análise, o autor utilizou a espécie Nanicão, confeccionou amostras com diferentes proporções da fibra e polpa do material (Figura 31 (a)), e, também, analisou a variação da parte do pseudocaule utilizado. A extração da fibra e da polpa foi realizada por meio do cozimento do pseudocaule e, posteriormente, realizou-se a centrifugação para a separação da fibra e polpa. Não houve a adição de aglutinante. Desenvolveu-se 6 amostras, sendo 3 constituídas pela polpa extraída do pseudocaule (1A, 1B e 1A1), e 3 por fibra (2A, 2B e 2A1). A Tabela 3 apresenta a composição das amostras e as características estudadas pelo autor.

Tabela 3 - Características das amostras desenvolvidas por Demarchi (2010).

	Amostra	Espessura (cm)	Massa específica (g/cm³)
Polpa	1A	5	0,29
	1B	5	0,10
	1A1	2	0,11
Fibra	2A	5	0,33
	2B	5	0,15
	2B1	2	0,11

Fonte: Demarchi (2010).

Após obter os coeficientes de absorção sonora das amostras, Demarchi (2010) concluiu que os melhores resultados foram os obtidos com a espessura de 5 cm, tendo a amostra 2A o melhor desempenho de absorção sonora, chegando a até 0,95 em aproximadamente 900 Hz, e, as amostras 1A1 e 2B1 (Figura 31 (b)) tiveram resultados inferiores, tendo como coeficiente máximo 0,65 em aproximadamente 1450 Hz.



Figura 31 - Bananeira: (a) fibra (BHATNAGAR *et al.*, 2015) (b) Amostra 2A confeccionada com a fibra (DEMARCHI, 2010).

Thilagavathi *et al.* (2010) analisaram a viabilidade do emprego da fibra de bananeira como método para controlar o ruído que chega no interior de veículos. Com esse intuito, os autores construíram um não tecido, também conhecido como TNT (tecido não tecido), esse tipo de material é utilizado como revestimentos, forros e carpetes de veículos. Construiu-se uma amostra tendo 6,43 mm de espessura e com a fibra possuindo 40 mm de comprimento, e, como aglutinante, adicionou-se polipropileno na proporção de 50:50. Como resultado o material apresentou baixo coeficiente de absorção sonora em toda a faixa de frequência estudada (0-1600 Hz), tendo como valor máximo aproximadamente 0,13 em 1250 Hz.

Tholkappiyan *et al.* (2016) determinaram a absorção sonora de amostras desenvolvidas com papel reciclado picado e a fibra de bananeira. Para isso foram confeccionadas amostras com 30 cm² e 2, 4 e 6 cm de espessura, tendo a fibra 1,5, 2,5 e 3,5 cm de comprimento. Na

constituição das amostras utilizou-se uma pequena quantidade de água, papel reciclado e uma fração volumétrica de 0,15, 0,20 e 0,25 de fibra. Nesse estudo, os autores apresentaram os resultados em coeficiente de redução sonora (*Noise reduction coefficient – NRC*), esta medida considera a média entre os coeficientes de absorção sonora nas bandas de oitava de 250, 500, 1000 e 2000 Hz. Após a análise dos resultados conclui-se que a variação nos parâmetros da fibra e do papel influenciam na absorção sonora do compósito. Sendo que, de todas as propriedades testadas, a espessura de 6 cm e a fibra com 3,5 cm, e a fração de volume de fibra de 0,20 demonstraram os melhores resultados na absorção sonora, tendo o NRC de aproximadamente 0,54.

Assim como Thilagavathi *et al.* (2010), Shariful *et al.* (2018) verificaram as propriedades acústicas de um não tecido com 7,35 mm desenvolvido com 35% de fibra de bananeira, 35% de poliéster e 30% de polipropileno. Ao fim do experimento, constatou-se que o TNT desenvolvido não possui bons resultados, pois, o coeficiente de absorção sonora máximo encontrado foi de 0.15 em aproximadamente 1100 Hz.

Nesse capítulo são apresentados os principais conceitos para a compreensão da metodologia deste estudo. Primeiramente distinguiu-se o som do ruído, posteriormente, apresentou-se a definição de onda sonora plana: tipo de onda propagada no interior do tubo de impedância. A seguir são apresentadas as formulações que regem a impedância acústica característica.

Além disso, apresenta-se a definição de absorção sonora e as equações para o cálculo do coeficiente de absorção sonora conforme a ISO 10534-2:2008. Em seguida, exibiu-se os conceitos de perda de transmissão sonora e de planejamento fatorial completo. Por fim, demonstrou-se a estrutura da bananeira.

3.1 SOM E RUÍDO

São várias as definições de som encontradas na literatura. Bistafa (2006) o diferencia do ruído. Conforme o autor, o ruído caracteriza-se como uma perturbação causadora de desconforto ao ouvido humano, diferente do som, pontuado como algo bom de ser escutado. Rienstra e Hirschberg (2014) o define como uma movimentação de pressão que se propaga como ondas em um meio, sendo perceptível ao ouvido humano, que é capaz de ouvir na faixa de frequência de 20 Hz a 20 kHz.

Sons ou ruídos são gerados por uma fonte sonora, conforme Gerges (1992), devido a sensibilidade do ouvido humano, é necessária uma pequena variação na pressão sonora para que um ruído aconteça e que a fonte geradora do ruído seja configurada como uma fonte sonora.

Na acústica é usual a utilização de valores em frequência f , dada em Hz (ciclos por segundo), sendo calculada conforme a Equação:

$$f = \frac{1}{T} \tag{1}$$

sendo T o período e é definido como o tempo necessário para que um ciclo se complete.

3.2 ONDA SONORA PLANA

Ondas com amplitude constante são designadas de ondas sonora planas, como exemplo, a Figura 32 (a) apresenta a propagação de ondas sonoras planas geradas por um alto falante posicionado em uma das extremidades de um duto. No exemplo, por meio da vibração do cone, as moléculas de ar passam por compressão (aglomeração das moléculas) e rarefação (afastamento das moléculas), sendo nas compressões os picos de amplitude, e maior concentração de pressão, e nas rarefações os vales, que é onde há as menores amplitudes e pressão sonora. A distância entre dois picos de amplitude chama-se comprimento de onda λ , indicado na Figura 32 (b).

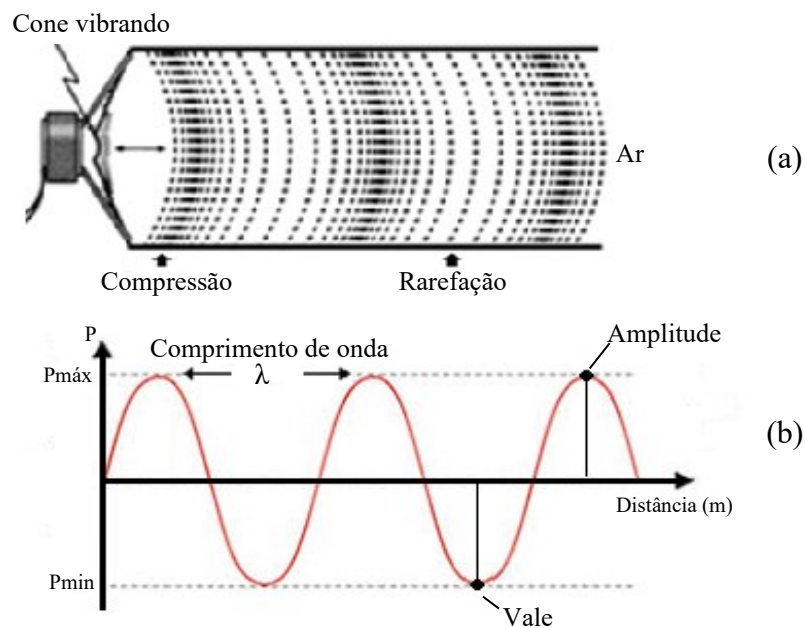


Figura 32 - Propagação sonora de ondas planas (Adaptado de FILHO, 2008; PAULA, 2020).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

em que c é a velocidade do som (m/s).

A quantidade de vezes que um comprimento de onda se repete em um metro é chamado de número de ondas k , esse valor pode ser obtido por meio da Equação abaixo:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

Como forma de garantir que no interior de um duto de seção circular exista somente ondas planas, calcula-se a frequência de corte, sendo o resultado da equação correspondente a frequência máxima que poderá ser incidida no interior do tubo.

$$f_c = \frac{1,84c}{d\pi} \quad (4)$$

sendo d o diâmetro interno do tubo (m).

3.3 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA

Para Kinsler (2000) e Gerges (1992) a impedância acústica específica é uma característica do meio de propagação e do tipo de ondas que chega até ele, podendo ser obtida pela divisão entre a pressão acústica P pela velocidade da partícula u .

$$z = \frac{P}{u} \quad (5)$$

sendo a velocidade da partícula u calculada conforme a Equação:

$$u = \frac{P}{\rho c} \quad (6)$$

em que ρc é a impedância característica do meio de propagação e dado em Rayls ou kg/(m²s).

Substituindo a Eq. (6) na Eq. (5) têm-se que a impedância acústica específica z é:

$$z = \rho c \quad (7)$$

De acordo com Gerges (1992) a impedância acústica específica para ondas estacionárias¹ é dada como um valor complexo.

$$z = re + ix \quad (8)$$

sendo re a resistência acústica e a parte real da impedância e x a reatância acústica e a parte imaginária da impedância.

3.4 ABSORÇÃO SONORA

Materiais de absorção acústica são utilizados para atenuar o som em edificações. Há, atualmente no mercado, diversos materiais fibrosos e porosos que garantem a redução de ruído. Dos materiais mais usuais, destaca-se: a lã de pet (KLIPPEL *et al.*, 2017), a lã de vidro (Figura 33 (a)) e de rocha (CROCE, 2019), ambos são materiais fibrosos que possuem bom desempenho acústico em médias e altas frequências e podem ser empregados em paredes (Figura 33 (b)), forros, pisos e outros.



Figura 33 – Lã de vidro: (a) manta (ISOMIL, 2019) (b) aplicação em parede *drywall* (ISOVER, 2019).

A absorção sonora por materiais fibrosos e porosos (Figura 34 (a) e (b)), segundo Bistafa (2006), se dá pela dissipação de energia sonora e pelo atrito causado pela movimentação das moléculas de ar no interior do material. Gerges (1992) afirma que a absorção sonora em materiais porosos se dá pela perda de energia acústica que, por meio da reflexão e atrito viscoso no interior dos poros que constituem o material, é transformada em energia térmica, similar ao

¹ Relação entre duas ondas idênticas (incidente e refletida) de sentidos opostos, onde a soma das amplitudes das ondas geram uma única onda com a mesma frequência e comprimento de onda (OUTA, 2014).

que ocorre em materiais fibrosos, onde a energia acústica incidente sobre o material é transformada em energia térmica ocasionada pela movimentação e atrito entre as fibras.

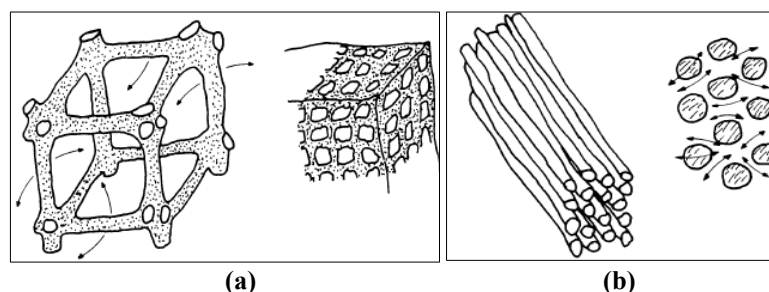


Figura 34 – Estrutura dos materiais de dissipação de energia: (a) porosos (b) fibrosos (GERGES, 1992).

O parâmetro que caracteriza a absorção sonora de um material é chamado de coeficiente de absorção sonora (α), o mesmo pode ser obtido por meio de uma relação entre a quantidade de som incidente e o absorvido por uma superfície (Figura 35) e é dado em uma escala de 0 a 1, sendo esse valor, multiplicado por 100, a porcentagem de absorção sonora do material em uma determinada frequência.

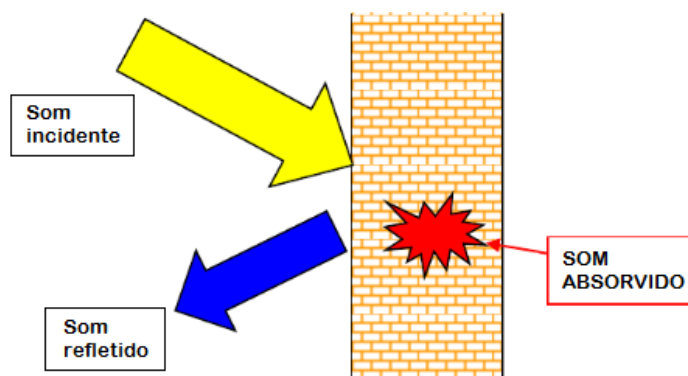


Figura 35 - Absorção de som por uma superfície (Adaptado de FERNANDES, 2009).

Os coeficientes de absorção sonora de materiais podem ser obtidos por meio de uma metodologia analítica, numérica ou experimental operando uma câmara reverberante ou um tubo de impedância. Há diversas normas que estabelecem procedimentos e equações para o cálculo da absorção sonora de um material. A ISO 354:2003 dita as equações e o procedimento de determinação do coeficiente de absorção sonora operando uma câmara reverberante, para a determinação do coeficiente por esse método utiliza-se um microfone omnidirecional, que capta a pressão sonora em todas as direções. Para ensaios no tubo de impedância há a ISO 10534-1:1996 e a ASTM C354:2003 que calcula o coeficiente por meio da captação da pressão

sonora em um microfone e as normas ASTM E1050:2019 e ISO 10534-2:1998 que determinam o coeficiente pela técnica da função de transferência entre dois microfones.

Neste estudo utilizou-se a técnica regida pela ISO 10534-2:1998. A escolha por esta técnica ocorreu devido a disponibilidade de um *software* com a ISO e pelos equipamentos adquiridos pela instituição de ensino, e, também, pela praticidade de confecção de pequenas amostras do material a ser analisado.

3.4.1 ISO 10534-2:1998

A absorção sonora de materiais pode ser representada por meio dos coeficientes de absorção sonora, dados em uma faixa de frequência. Entre as normatizações utilizadas para a determinação da absorção sonora de materiais há a ISO 10534-2:1998, que calcula o coeficiente de absorção sonora por meio da função de transferência entre dois microfones.

Para o cálculo do coeficiente de absorção sonora utiliza-se um tubo de impedância composto por uma fonte sonora, localizada em uma das extremidades do tubo. A mesma gera ondas planas no interior do tubo, sendo que, parte das ondas são dissipadas pela amostra localizada no fim do tubo de impedância e parte são refletidas. A pressão sonora no interior do tubo é captada por dois microfones, os microfones transformam a pressão sonora em sinal elétrico e o transfere para um sistema de aquisição de dados. A Figura 36 apresenta a direção das ondas incidentes e refletidas, os equipamentos ligados ao tubo de impedância e os espaçamentos fundamentais para o entendimento das equações desta seção.

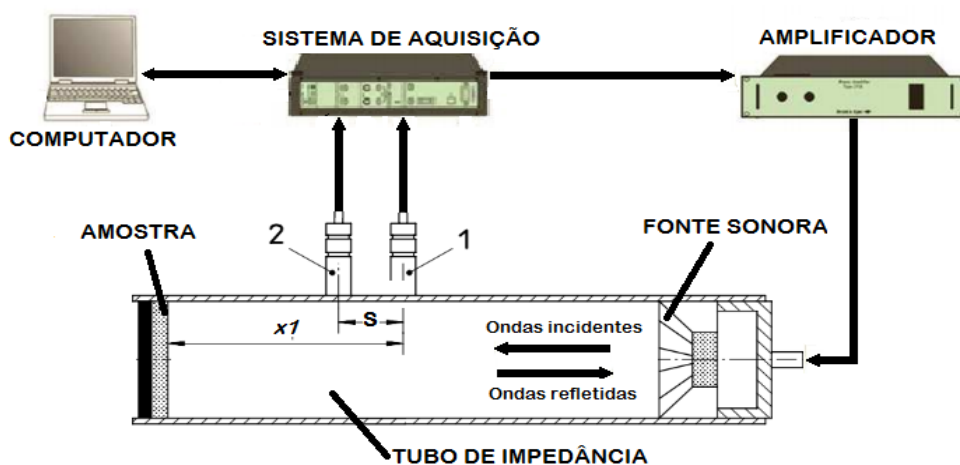


Figura 36 - Equipamentos empregados no cálculo do coeficiente de absorção sonora
(Adaptado de ISO 10534-2, 1998; MOHAMMADI e MAHJOOB, 2009).

De acordo com a ISO, o cálculo do coeficiente de absorção é realizado conforme a equação:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (9)$$

sendo r o fator de reflexão do som.

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jkx_1} \quad (10)$$

onde H_{12} é a função de transferência entre os microfones 1 e 2, calculada pelo sinal obtido pelos microfones na posição 1 e 2, H_I e H_R é a função de transferência entre as ondas incidentes e refletidas, respectivamente.

$$H_I = e^{-jk(x_1 - x_2)} = e^{-jks} \quad (11)$$

$$H_R = e^{jk(x_1 - x_2)} = e^{jks} \quad (12)$$

em que s é a distância entre os microfones (m) e, x_1 e x_2 são as distâncias entre a amostra e o microfone da posição 1 e 2, respectivamente.

A função de transferência H_{12} é calculada pela razão entre as pressões sonoras complexas captadas pelos microfones nas posições 1 e 2.

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} \quad (13)$$

3.4.2 Coeficiente de redução sonora

Por meio dos coeficientes de absorção sonora de um material é possível calcular o seu coeficiente de redução sonora (*noise reduction coefficient*, NRC). Tal parâmetro apresenta-se como um valor que representa a absorção sonora do material e usualmente é utilizado para a comparação com outros materiais (BARRON, 2001). O NRC é determinado calculando-se a média aritmética entre os coeficientes de absorção sonora na banda de oitava de 250, 500, 1000 e 2000 Hz (BISTAFA, 2006).

$$NRC = \frac{1}{4} [\alpha(250 \text{ Hz}) + \alpha(500 \text{ Hz}) + \alpha(1000 \text{ Hz}) + \alpha(2000 \text{ Hz})] \quad (14)$$

Sendo esse valor usualmente apresentado em múltiplos de 0,05 (BARRON, 2001).

3.5 PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA

A perda de transmissão sonora (*sound transmission loss*, TL) é um parâmetro que indica a capacidade de isolamento sonoro de um material. O isolamento de ambientes utilizando materiais acústicos é realizado para a atenuação do ruído externo e interno e para garantir que o ruído gerado no interior de uma edificação não seja transmitido para meios externos.

De acordo com Barron (2001) a TL pode ser dada como a relação entre as potências acústica w incidentes e as transmitidas sobre uma superfície.

$$TL = 10 \log \frac{w_{\text{incidente}}}{w_{\text{transmitida}}} \quad (\text{dB}) \quad (15)$$

A partir do resultado da equação têm-se a capacidade de isolamento acústico de uma superfície, sendo que, quanto maior a TL, mais isolante é a superfície (GERGES, 1992).

Para o perfeito entendimento da TL têm-se o exemplo da Figura 37 em que um som é incidido sobre uma superfície e parte deste som é refletido, permanecendo no meio interno, parte é absorvido e o restante é transmitido para um meio externo. A TL é o parâmetro que representa a capacidade que esta superfície possui de refletir o som (ou a energia sonora) que chega até ela.

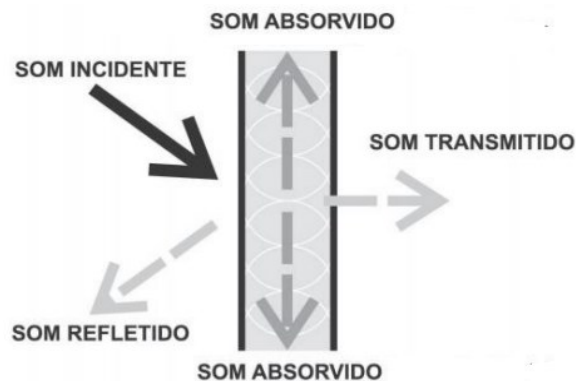


Figura 37 – Transmissão de som entre diferentes meios (Adaptado de CARVALHO, 2010).

Materiais porosos apresentam boa resistência ao fluxo de ar, levando a boa perda de transmissão sonora por meio da reflexão das ondas sonoras pelos poros do material. A Figura 38 apresenta a reflexão do som pelos poros de um material.

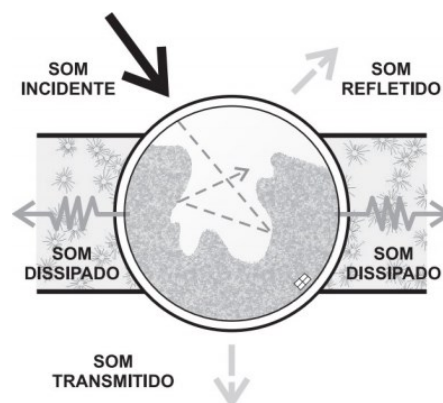


Figura 38 - Reflexão do som por material poroso (CARVALHO, 2010).

A transmissão sonora pode variar quando são adotadas, para um mesmo material, diferentes densidades e frequências de incidência. Tal afirmação é confirmada pela lei das massas, que indica que a TL aumenta 6 dB ao ser adotado o dobro da massa ou da frequência de incidência (BISTAFA, 2006). Conforme Tadeu (2010) o aumento da capacidade de isolamento do material, quando se aumenta a densidade, se dá pelo acréscimo da força de inércia.

3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com o intuito de obter resultados confiáveis após o desenvolvimento das amostras, para o planejamento experimental deste estudo, utilizou-se um planejamento fatorial completo. Tal metodologia tem como função averiguar o modo como a variação dos parâmetros (comprimento da fibra, espessura e densidade da amostra) empregados no desenvolvimento de experimentos afetam o resultado da análise. No planejamento fatorial os parâmetros analisados são chamados de fatores e os valores atribuídos aos fatores são os níveis. Neste estudo utilizou-se um planejamento fatorial completo 2^3 , tendo variado 3 fatores em 2 níveis.

A partir da resolução do fatorial chega-se a quantidade de experimentos necessários para a combinação de todos os níveis e fatores. Tendo neste estudo utilizado um planejamento fatorial completo do tipo 2^3 , isso implica que foi necessário a confecção de 8 amostras em cada configuração desenvolvida.

Após a definição dos fatores e níveis cria-se a matriz de planejamento. Para isto, neste estudo, utilizou-se a metodologia apresentada por Neto *et al.* (2001), onde todas as colunas começam com o fator (-), e, na primeira coluna, os fatores são intercalados um a um, na segunda coluna de dois em dois e na terceira coluna de quatro em quatro, esta organização é chamada de ordem padrão e são empregadas para a construção da matriz de planejamento (Tabela 4).

Tabela 4 – Matriz de planejamento.

Amostra	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Resultado
Amostra1	-	-	-	Result1
Amostra2	+	-	-	Result2
Amostra3	-	+	-	Result3
Amostra4	+	+	-	Result4
Amostra5	-	-	+	Result5
Amostra6	+	-	+	Result6
Amostra7	-	+	+	Result7
Amostra8	+	+	+	Result8

Para a análise dos resultados confeccionou-se 3 réplicas para cada tipo de amostra. A matriz de planejamento para cada configuração de amostra (A, B, C e D), está contida na metodologia, na seção de fabricação das amostras.

A análise dos resultados de interação entre fatores foi realizada no *software* estatístico Minitab versão 17.

3.7 CULTURA E ESTRUTURA DA BANANEIRA

Dentre os países com maior produção de bananas no mundo, encontra-se o Brasil em quarto lugar produzindo cerca de 6 milhões de toneladas em 2017 (FAO, 2017). A cultura da bananeira no Brasil abrange todo o território nacional, entretanto, há estados onde a banana é produzida em maior escala. Em 2017 a região Nordeste representava cerca de 34% da produção de bananas, seguidas pelas regiões Sudeste, Sul, Norte e Centro Oeste com 33%, 15%, 13% e 5%, respectivamente (IBGE, 2017).

De acordo com a EMBRAPA (2012) a bananeira, basicamente, é composta pelas raízes, que tem como principal característica a absorção de água e nutrientes, o caule (rizoma), responsável pelo desenvolvimento das folhas, o pseudocaule, formado por bainhas justapostas, as folhas, cacho (fruto) e o coração. A Figura 39 apresenta a estrutura padrão das bananeiras.

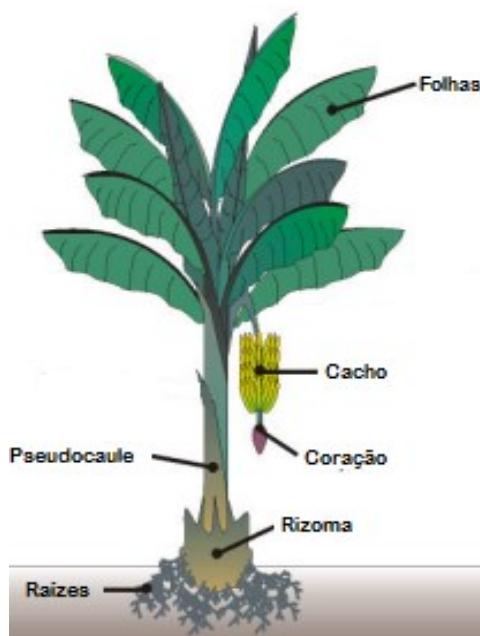


Figura 39 - Estrutura da bananeira (JUNIOR, 2001).

O pseudocaule é constituído por bainhas que possuem formato arredondado para acompanhar o talo central. A bainha é formada pela parte interna, intermediária (renda) e

externa e no interior da bainha há uma camada de ar que mantém a umidade das partes internas e externas.

Após a produção da fruta e a retirada do cacho, a bananeira é cortada entre o pseudocaule e o rizoma. Após o corte, o pseudocaule é, frequentemente, cortado e descartado no meio ambiente, gerando a proliferação de fungos.

A reutilização do pseudocaule apresenta grande potencial para a produção de artesanatos, aplicações para o melhoramento da rigidez de materiais, etc. Além disso, o pseudocaule também pode ser reutilizado para a extração de fibras. A fibra extraída possui bom desempenho mecânico para aplicação em materiais poliméricos (JORDAN *et al.*, 2017), produção de fios para a indústria têxtil (PITIMANEEYAKUL, 2009), entre outros.

Para a confecção das amostras utilizadas nos ensaios, primeiramente, realizou-se a extração da fibra do pseudocaule da bananeira. Elaborou-se 4 distintas configurações para a construção das amostras, as mesmas foram submetidas ao ensaio experimental no tubo de impedância. Posteriormente, utilizou-se a impedância acústica de duas amostras, adquiridas no *software* VA-Lab4, para modelar uma amostra dentro do tubo de impedância e validar um modelo numérico criado no *software* ANSYS® *Workbench*.

4.1 EXTRAÇÃO DA FIBRA

A fibra utilizada neste estudo foi extraída manualmente do pseudocaule da bananeira. O fruto da bananeira empregada é do tipo prata, cuja espécie é *Musa* spp., a planta (Figura 40 (a)) foi extraída da fazenda Barreiro situada na cidade de Ouro Verde de Goiás localizada na região Centro Oeste do Brasil (Figura 40 (b)). A planta extraída tinha aproximadamente 13 meses de vida, contados a partir do plantio

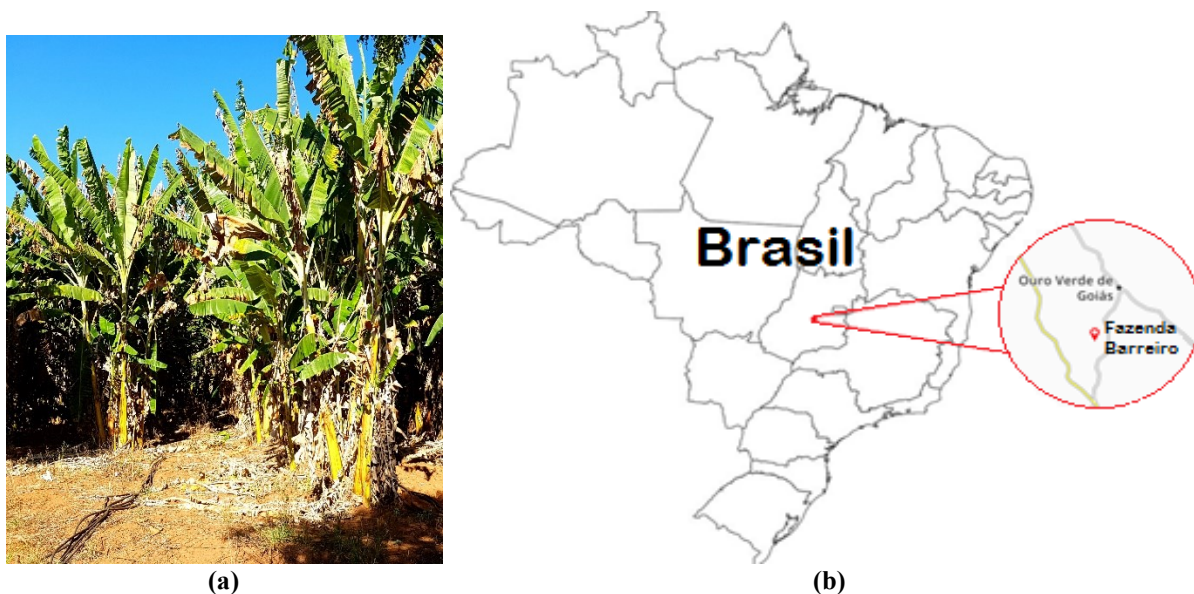


Figura 40 – Bananeira: (a) plantação (b) local de retirada da planta (Adaptado de TUDOGEO, 2019).

A coleta do pseudocaule foi feita após a colheita do cacho de bananas. A Figura 41 (a) apresenta a extração do pseudocaule e a Figura 41 (b) exibe o pseudocaule cortado e armazenado para a extração da fibra.



Figura 41 – Pseudocaule: (a) extração (b) após o corte.

O primeiro passo para a extração da fibra é a separação das bainhas que formam o pseudocaule (Figura 42 (a)). Com o intuito de facilitar o manuseio do material, realizou-se, primeiramente, cortes longitudinais ao longo do comprimento das bainhas (Figura 42 (b)), e, posteriormente, cortes transversais (Figura 42 (c)), obtendo-se pedaços menores e com comprimento de aproximadamente 20 cm.

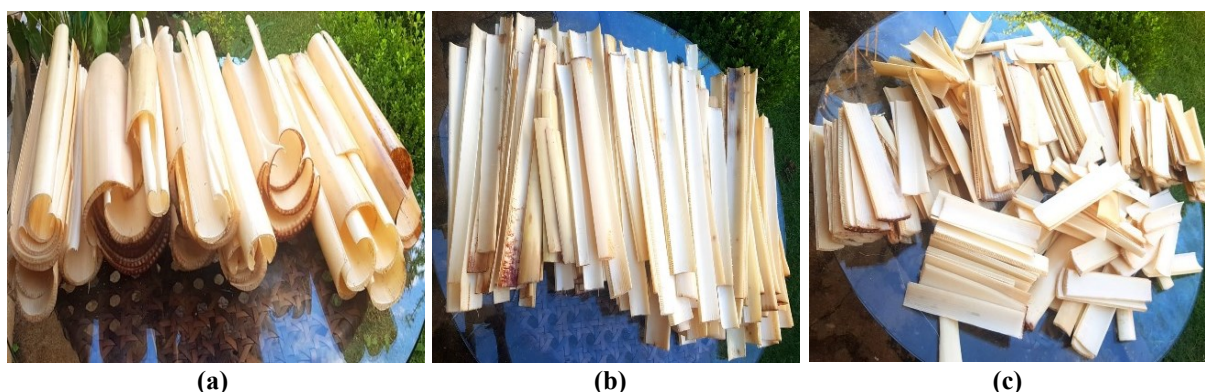


Figura 42 – Bainhas: (a) separação (b) cortes longitudinais (c) cortes transversais.

A Figura 43 apresenta as partes que constituem a bainha. Conforme foi verificado no estudo de Demarchi (2010) as partes externas são as que possuem maior concentração de fibras, por esse motivo, neste estudo utilizou-se essas partes para a extração das fibras.

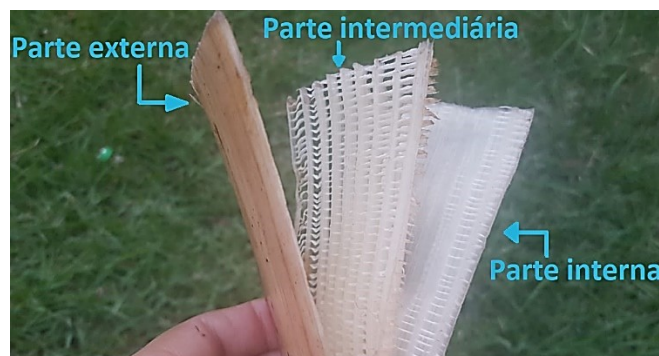


Figura 43 – Partes que compõem a bainha.

Posteriormente a divisão das partes que formam a bainha, separou-se as partes externas e retirou-se as fibras manualmente. Para isso, com uma faca pequena e pouco afiada, raspou-se a parte escolhida até a aparição das fibras, por fim cortou-se as fibras com o comprimento estabelecido na matriz de planejamento de cada amostra. A Figura 44 exhibe o procedimento de extração das fibras.

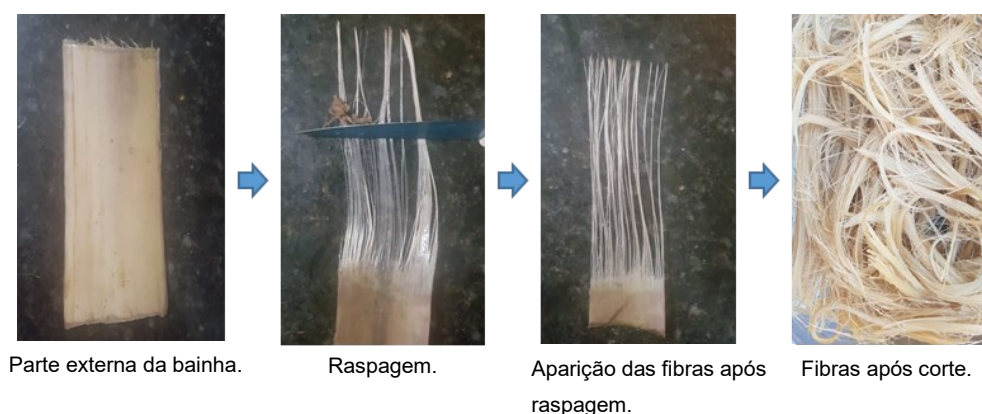


Figura 44 – Processo de extração das fibras.

Após a extração, para facilitar a retirada de pequenos fragmentos que permaneceram aderidos às fibras, as mesmas foram submersas em água em temperatura ambiente (aproximadamente 23°C) por aproximadamente 30 minutos. Posteriormente, realizou-se uma nova inspeção de limpeza e, por fim, a fibra passou por secagem em temperatura ambiente por 48 horas.

Com base na revisão bibliográfica apresentada neste trabalho, percebeu-se que grande parte dos estudos que utilizaram fibras naturais para fins de desenvolver um material ou verificar o potencial acústico das fibras não realizaram o tratamento químico das mesmas. Por esse motivo, este estudo não realizou o tratamento químico das fibras.

A Figura 45 apresenta o fluxograma das atividades desenvolvidas desde a extração até a obtenção das fibras.

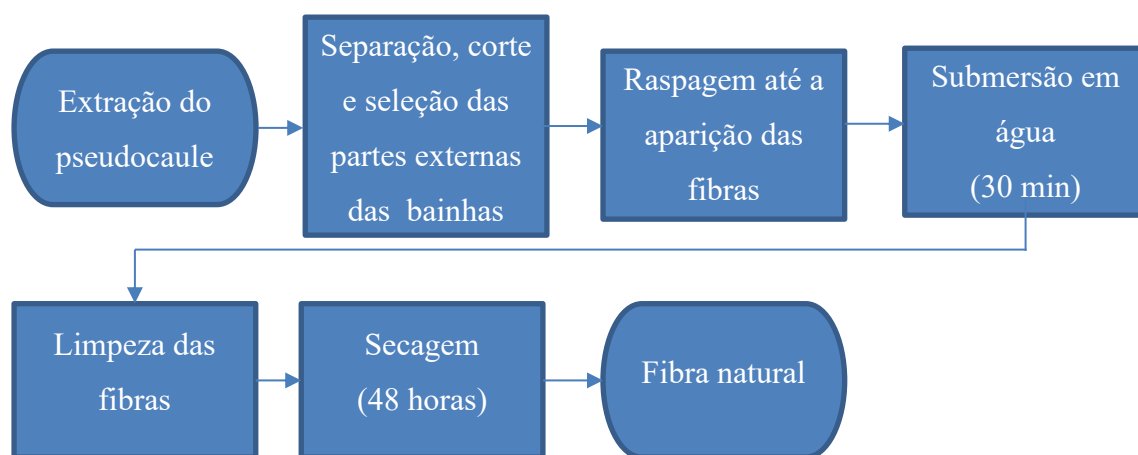


Figura 45 - Procedimento adotado para a extração da fibra do pseudocaule da bananeira (*Musa spp.*).

4.2 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a confecção das amostras determinou-se 4 distintas configurações. Na primeira configuração construiu-se amostras com a fibra natural e sem a adição de ligantes, identificou-se as amostras desta configuração indicando-as pela letra A. Na segunda, realizou-se uma aplicação das amostras confeccionadas na configuração 1 por meio da construção de amostras no formato de painéis sanduíche, estas foram as amostras B. Na terceira configuração, amostras C, confeccionou-se amostras com a fibra e uma cola natural. Por fim, na quarta configuração, amostras D, utilizou-se as amostras C aplicando-as no interior de um painel sanduíche. O procedimento de fabricação das amostras é artesanal, ou seja, com exceção da balança de precisão, não se utilizou equipamentos de laboratório para a fabricação.

4.2.1 Configuração 1

As amostras desta configuração são formadas, unicamente, por fibra, não havendo a adição de ligante. Para a construção do planejamento fatorial adotou-se os fatores principais: comprimento das fibras, espessura e densidade das amostras. A Tabela 5 apresenta os níveis

escolhidos para cada fator. Para a escolha do fator espessura considerou-se valores que possam ser utilizados na configuração 2, sendo valores baseado no trabalho de Cunha (2012).

Tabela 5 - Níveis e fatores adotados no planejamento fatorial.

Níveis	Comprimento das fibras (mm)	Espessura da amostra (mm)	Densidade (kg/m ³)
n-	10,00	7,00	80,00
n+	70,00	10,00	120,00

Para facilitar a visualização da composição e a estrutura de cada amostra, inseriu-se os níveis indicados na Tabela 5 na matriz de planejamento (Tabela 4), como pode ser visualizado na Tabela 6.

Tabela 6 – Matriz de planejamento com os níveis e fatores adotados para as amostras A.

Amostra	Comprimento das fibras (mm)	Espessura da amostra (mm)	Densidade (kg/m ³)
A1	10,00	7,00	80,00
A2	70,00	7,00	80,00
A3	10,00	10,00	80,00
A4	70,00	10,00	80,00
A5	10,00	7,00	120,00
A6	70,00	7,00	120,00
A7	10,00	10,00	120,00
A8	70,00	10,00	120,00

Obs.: Para cada amostra foram confeccionadas 3 réplicas.

Para a confecção das amostras, inicialmente, aferiu-se as massas e, determinada a quantidade exata de fibra para que a amostra tivesse a densidade desejada, prensou-se as fibras com água dentro de um molde com o diâmetro interno igual ao do porta-amostra do tubo de impedância (30 e 60 mm) até a formação de uma manta com 7,00 ou 10,00 mm de espessura. As amostras passaram por secagem em temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) por um período de 24 horas até que a água absorvida pelas fibras fosse totalmente extinguida. A Figura 46 apresenta o processo de fabricação das amostras. Encontra-se no Apêndice A a massa calculada para a fabricação de cada amostra.



Figura 46 - Processo de fabricação das amostras A

Para evitar que a umidade absorvida pelas amostras causasse alterações nos resultados, verificou-se, após as 24 horas de secagem, a massa das amostras para constatar que a mesma fosse semelhante ao valor inicial. No caso de divergência na massa, colocou-se novamente a amostra para secar por 24 horas e repetiu-se o processo de aferição da massa.

Confeccionou-se amostras com os mesmos diâmetros dos porta-amostras do tubo de impedância: 30 e 60 mm. Além disso, para cada tipo (A1, A2...) de amostra, fabricou-se 3 réplicas. A Figura 47 apresenta as amostras desenvolvidas e submetidas ao ensaio no tubo de impedância.

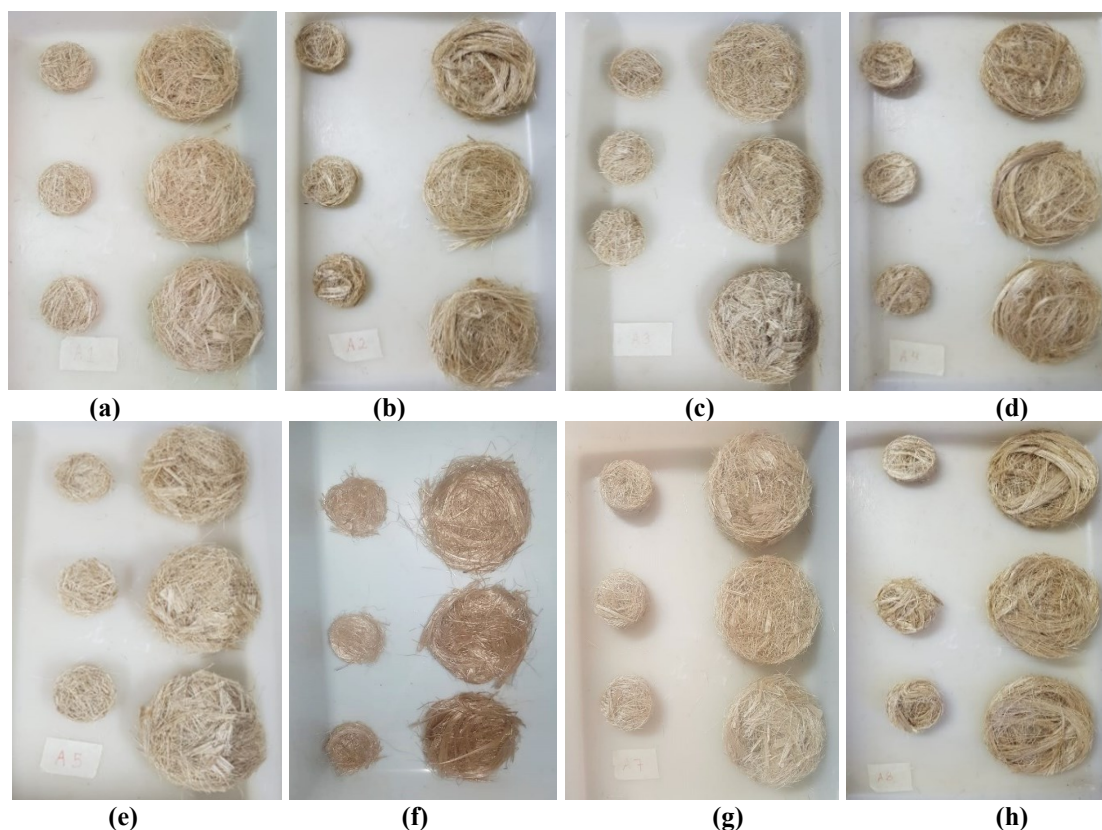


Figura 47 – Amostras de fibra do pseudocaule da bananeira: (a) A1 (b) A2 (c) A3 (d) A4 (e) A5 (f) A6 (g) A7 (h) A8.

4.2.2 Configuração 2

A configuração 2 teve como intuito apresentar uma aplicabilidade para as amostras de fibras confeccionadas na configuração 1, nesta configuração fabricou-se amostras no formato de painéis sanduíche (Figura 48). O desenvolvimento desta configuração teve como finalidade a simulação de uma estrutura pré-moldada instalada em edificações como alvenaria de vedação (paredes).

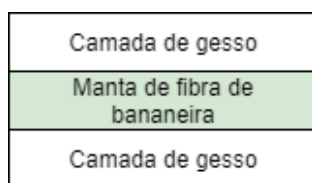


Figura 48 – Formato das amostras B.

Para a confecção das amostras adotou-se os níveis de 5,00 e 7,50 mm para a espessura de cada camada de gesso que forma os painéis sanduíche, as espessuras das amostras de fibra e as densidades foram as mesmas adotadas na configuração 1, sendo 7,00 e 10,00 mm e, 80 e 120 kg/m³, respectivamente (Tabela 7). Para a composição das amostras seria ideal a utilização das espessuras dos painéis de gesso encontrados no mercado, equivalente a 12,50 mm, porém, devido a limitação máxima de 25,00 mm de espessura cabível no porta-amostra do tubo de impedância utilizado nos experimentos, adotou-se camadas de gesso que gerassem amostras com a espessura total de até 25,00 mm.

Tabela 7 - Níveis e fatores adotados no planejamento fatorial para a configuração 2.

Níveis	Espessura da camada de gesso (mm)	Espessura da camada de fibra (mm)	Densidade da camada de fibra (kg/m ³)
-	5,00	7,00	80,00
+	7,50	10,00	120,00

A matriz de planejamento seguiu a ordem padrão. A Tabela 8 apresenta o planejamento fatorial com os níveis indicados na Tabela 7 já substituídos.

Tabela 8 - Matriz de planejamento com os níveis e fatores adotados para a confecção das amostras B.

Amostra	Espessura da camada de gesso (mm)	Espessura da camada de fibra (mm)	Densidade da camada de fibra (kg/m ³)
B1	5,00	7,00	80,00
B2	7,50	7,00	80,00
B3	5,00	10,00	80,00
B4	7,50	10,00	80,00
B5	5,00	7,00	120,00
B6	7,50	7,00	120,00
B7	5,00	10,00	120,00
B8	7,50	10,00	120,00

Obs.: Para cada amostra foram confeccionadas 3 réplicas.

Para a confecção dos painéis de gesso utilizou-se o fator água/gesso de 0,8, valor indicado pelo fabricante CF Gesso Fácil. As camadas foram preparadas em um molde cilíndrico de PVC, esperou-se 3 horas para a secagem e desforme do gesso, a Figura 49 apresenta esse processo.

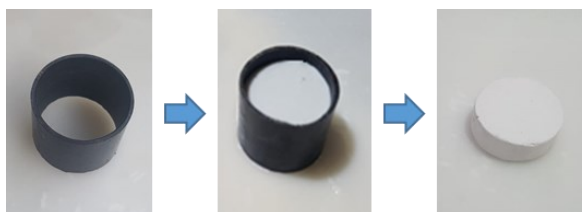


Figura 49 - Fabricação das amostras de gesso.

A montagem das amostras B seguiu o procedimento: colocou-se a primeira camada de gesso no molde cilíndrico, inseriu-se a amostra de fibra, e, por fim, adicionou-se a outra camada de gesso. As amostras foram confeccionadas em conformidade com as características descritas no planejamento fatorial completo para esta configuração, conforme Tabela 8. A Figura 50 apresenta as amostras fabricadas.

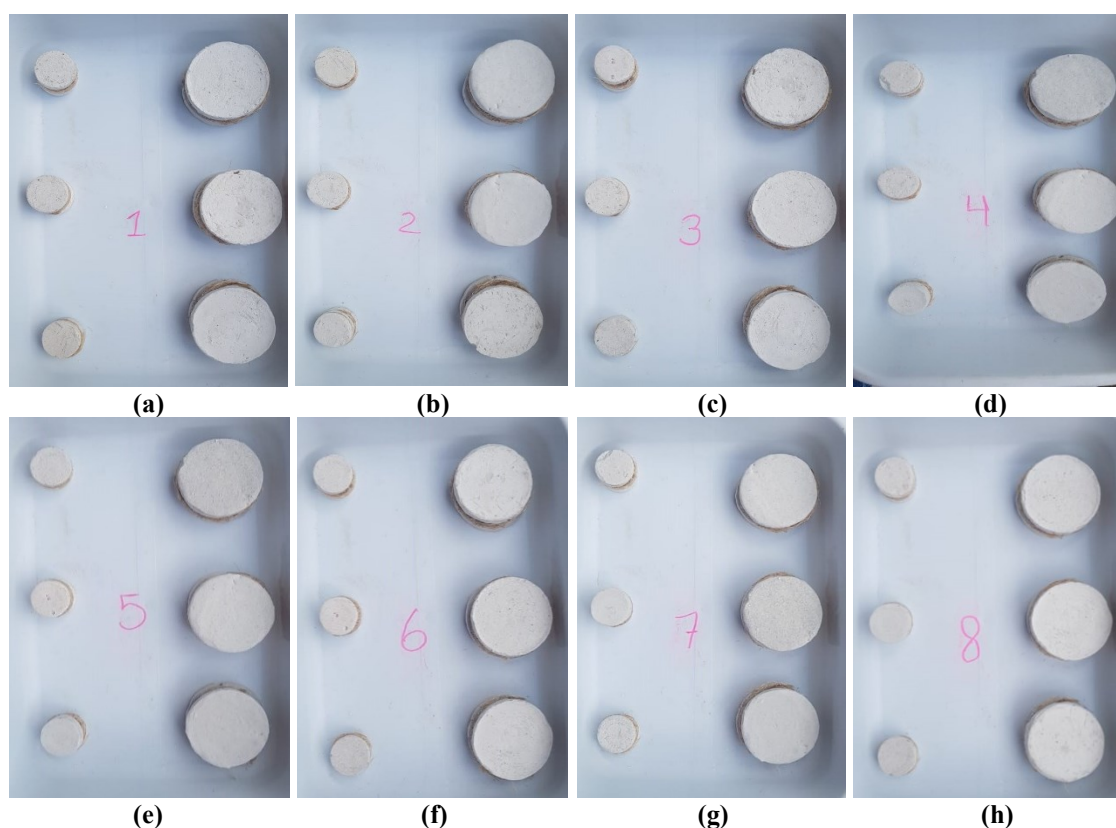


Figura 50 - Amostras em formato de sanduíche com fibra do pseudocaule da bananeira e gesso: (a) B1 (b) B2 (c) B3 (d) B4 (e) B5 (f) B6 (g) B7 (h) B8.

Para a verificação se a camada interna de fibra apresentou alguma melhoria no painel sanduíche, após a execução dos ensaios selecionou-se duas amostras com os melhores desempenhos e comparou-se com os coeficientes de absorção e perdas de transmissão sonora de dois painéis sem adição da fibra, ou seja, com o interior sem preenchimento. Testou-se dois painéis de gesso com distintas espessuras, sendo um com as camadas possuindo 5,00 mm e o outro com 7,50 mm.

4.2.3 Configuração 3

As amostras desta configuração são constituídas pela fibra de bananeira e uma cola natural. A escolha da cola a ser aplicada nas amostras levou-se em consideração que: (a) o material (ou amostras) criadas após a aplicação da cola deveria ser 100% natural, (b) era desejado que as amostras ficassem incolor após a aplicação da cola (c) as amostras não

poderiam ficar dúctil, impedindo a movimentação das fibras e, conseqüentemente, diminuindo a capacidade de absorção sonora.

Após a análise dos itens citados e da realização de ensaios, decidiu-se pela confecção de amostras com a aplicação de uma cola natural fabricada com polvilho e água. Antes da fabricação das amostras elaborou-se o planejamento fatorial onde adotou-se os mesmos níveis da configuração 1 de forma que, ao fim do processo, seja possível analisar se a adição de cola melhorou o desempenho acústico das amostras.

Adotando como fatores principais o comprimento das fibras, densidade e espessura da amostra, a matriz de planejamento para estas amostras é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Matriz de planejamento das amostras C.

Amostra	Comprimento das fibras (mm)	Espessura da amostra (mm)	Densidade da amostra (kg/m ³)
C1	10,00	7,00	80,00
C2	70,00	7,00	80,00
C3	10,00	10,00	80,00
C4	70,00	10,00	80,00
C5	10,00	7,00	120,00
C6	70,00	7,00	120,00
C7	10,00	10,00	120,00
C8	70,00	10,00	120,00

Obs.: Para cada amostra foram confeccionadas 3 réplicas.

Para a fabricação das amostras desta configuração, primeiramente, preparou-se a cola natural com polvilho caseiro. A fabricação iniciou-se com a mistura de 30 g de polvilho em 200 mL de água, levou-se ao fogo por 3 minutos, tempo necessário para que a consistência da mistura fosse similar a de uma cola comercial.

Após a produção da cola natural aferiu-se a massa da amostra a ser confeccionada subtraindo cerca de 1 g de cada amostra, para que ao fim do processo de adição da cola as amostras tivessem a massa desejada. Posteriormente, colocou-se as fibras no molde cilíndrico, pressionou-se até a formação de uma manta com 7,00 ou 10,00 mm de espessura, colocou-se 4 g de cola sobre a superfície da amostra, quantidade suficiente para a união das fibras sem que a amostra ficasse rígida. Deixou-se secar por 12 horas em temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) e repetiu-se o processo aplicando a cola no lado oposto.

Posteriormente, desmoldou-se a amostra, aplicou-se cola nas laterais e secou-se por 12 horas. A Figura 51 apresenta o processo de fabricação das amostras.



Figura 51 - Processo de fabricação das amostras C.

Confeccionou-se amostras com os mesmos diâmetros dos porta-amostras do tubo de impedância: 30 e 60 mm. Além disso, para cada tipo (C1, C2...) de amostra, fabricou-se 3 réplicas. A Figura 52 apresenta as amostras desenvolvidas e submetidas ao ensaio experimental no tubo de impedância.

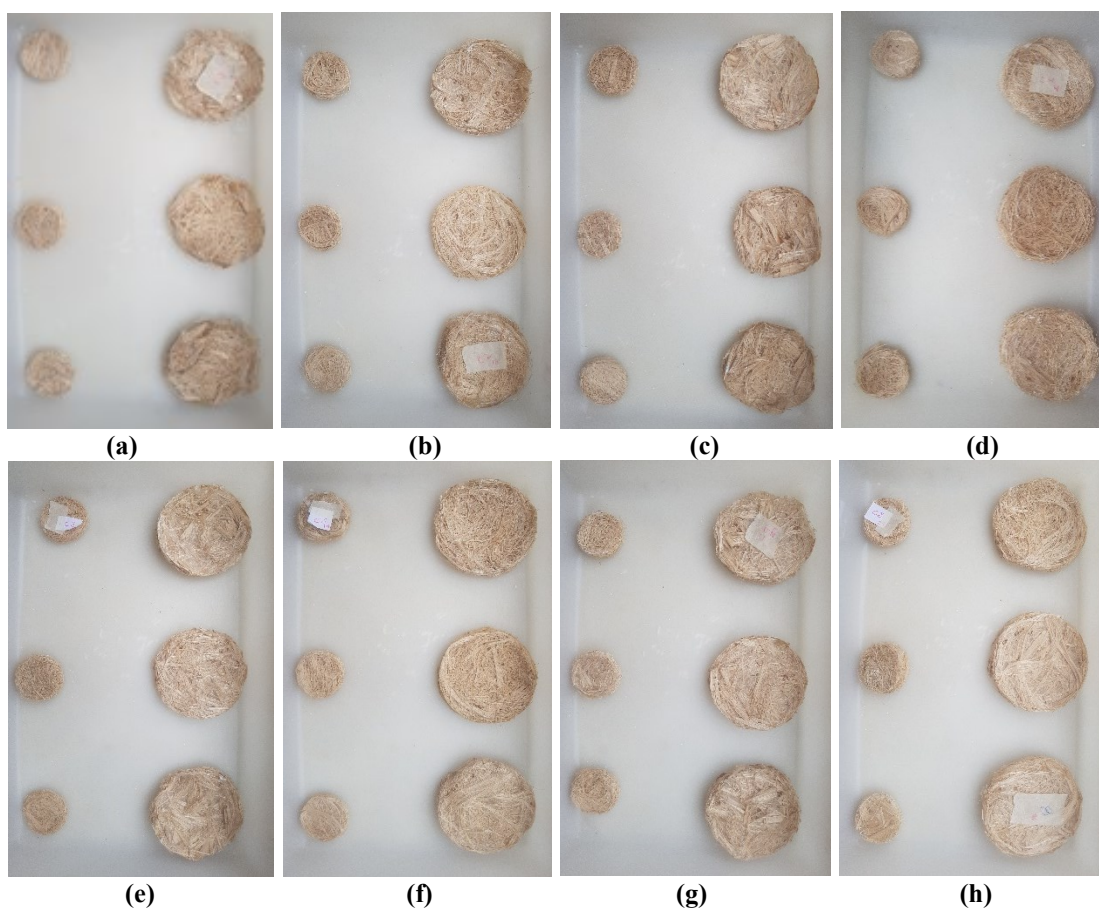


Figura 52 - Amostras desenvolvidas com a fibra do pseudocaule da bananeira e cola natural: (a) C1 (b) C2 (c) C3 (d) C4 (e) C5 (f) C6 (g) C7 (h) C8.

4.2.4 Configuração 4

Nesta configuração confeccionou-se amostras no formato de painel sanduíche. Esse tipo de estrutura é frequentemente utilizada em tratamentos acústicos, sendo empregadas, principalmente, em forros de edificações. Tal estrutura é formada por um material sem perfurações, uma camada interna de fibra ou ar e uma camada do painel perfurado, conforme Figura 53.

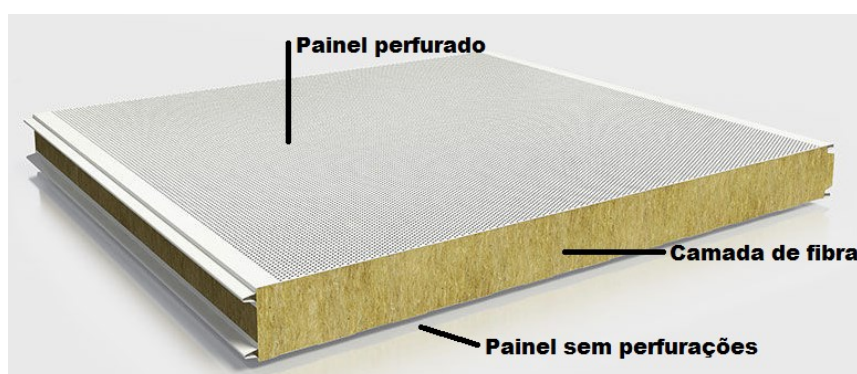


Figura 53 - Painel sanduíche acústico (Adaptado de ARCHIEXPO, 2019).

Para a fabricação das amostras D adotou-se como fatores principais: a espessura da camada de gesso e a espessura e densidade da camada de fibra. A matriz de planejamento desta configuração é apresentada na Tabela 10 e é idêntica à adotada para a configuração B.

Tabela 10 - Matriz de planejamento com os níveis e fatores adotados para as amostras D.

Amostra	Espessura da camada de gesso (mm)	Espessura da camada de fibra (mm)	Densidade da camada de fibra (kg/m ³)
D1	5,00	7,00	80,00
D2	7,50	7,00	80,00
D3	5,00	10,00	80,00
D4	7,50	10,00	80,00
D5	5,00	7,00	120,00
D6	7,50	7,00	120,00
D7	5,00	10,00	120,00
D8	7,50	10,00	120,00

Obs.: Para cada amostra foram confeccionadas 3 réplicas.

As amostras desenvolvidas possuem a estrutura similar a apresentada na Figura 53. Sendo que, na parte interna do painel inseriu-se as amostras de fibra com a cola natural fabricadas na configuração 3 e para as camadas externas do painel fabricou-se amostras de gesso.

O painel de gesso confeccionado teve as configurações (diâmetro e distância entre os furos) do drywall de gesso da empresa Knauf (Figura 54), com exceção das espessuras, que estão indicadas na matriz de planejamento da Tabela 10. A adoção das espessuras dos painéis de gesso e as amostras de fibra tiveram como limitação o comprimento máximo cabível no porta-amostras do tubo de impedância, que possui 25,00 mm, sendo esse o valor máximo adotado como espessura total para as amostras.

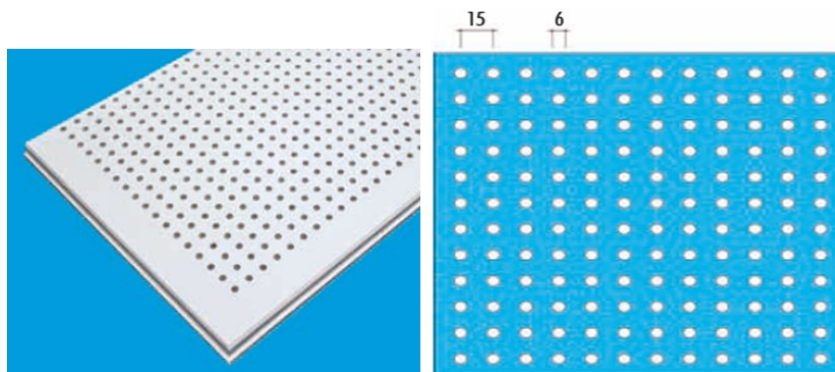


Figura 54 - Distância e diâmetro, em milímetros, dos furos do painel perfurado Knauf (KNAUF, 2019).

Por não haver no mercado placas de gesso perfurado com 5,00 mm, sendo a menor espessura igual a 12,00 mm, neste estudo optou-se por confeccioná-las. Para a fabricação simulou-se o painel perfurado demonstrado na Figura 54 desenhando, em uma folha A3, os pontos centrais das perfurações. Em seguida, com um compasso, desenhou-se círculos com 30 e 60 mm de diâmetro, cortou-se os círculos e os posicionou sobre as amostras e, com uma broca de furadeira com 6 mm de diâmetro, realizou-se os furos sobre os pontos. O processo de fabricação das amostras é indicado na Figura 55.

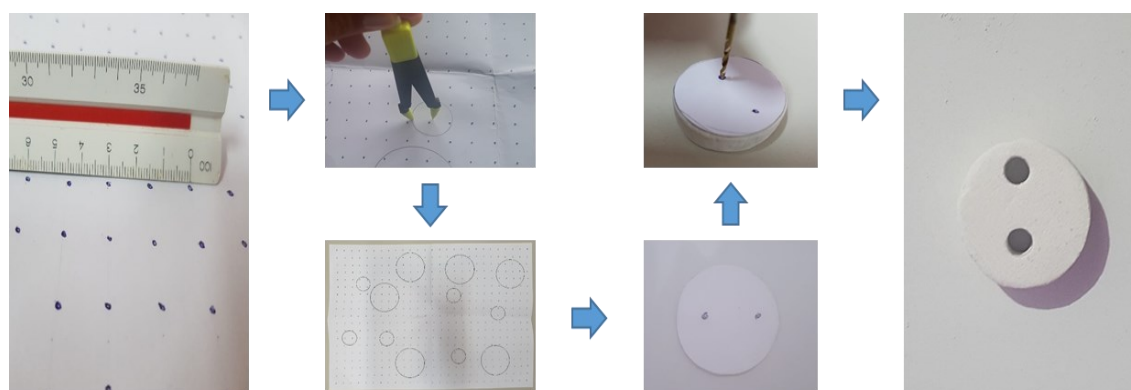


Figura 55 - Processo de produção das amostras de gesso perfurado.

Para a montagem das amostras utilizou-se uma camada de gesso sem perfuração fabricada na configuração 2, uma camada de fibra com cola desenvolvida na configuração 3 e uma camada de gesso perfurado. A Figura 56 apresenta o formato das amostras desenvolvidas nesta configuração.

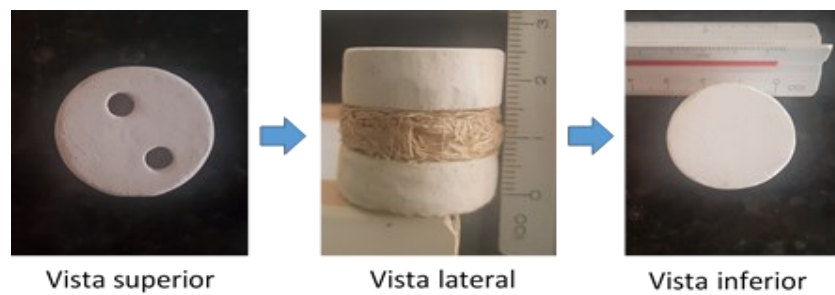


Figura 56 - Formato das amostras D.

As amostras foram confeccionadas em conformidade com as características descritas no planejamento fatorial completo para esta configuração, conforme Tabela 10. A Figura 57 apresenta as amostras fabricadas.

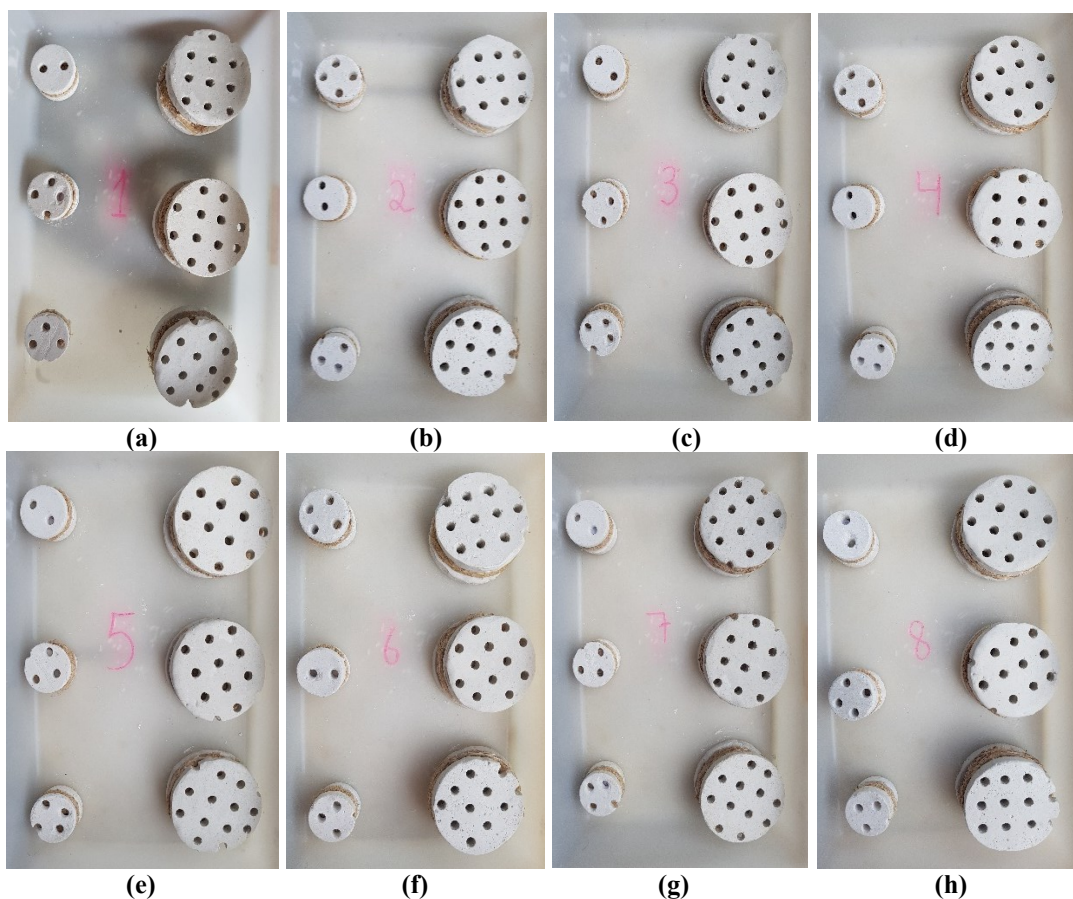


Figura 57 - Amostras em formato de painel sanduíche com camadas externas de gesso e internas de fibra e cola: (a) D1 (b) D2 (c) D3 (d) D4 (e) D5 (f) D6 (g) D7 (h) D8.

4.3 ENSAIO EXPERIMENTAL NO TUBO DE IMPEDÂNCIA

O ensaio experimental consistiu na verificação do coeficiente de absorção sonora e da perda de transmissão sonora das amostras desenvolvidas. Realizou-se os ensaios operando os tubos de impedância modelo SW466, um dos tubos possui um autofalante acoplado à sua estrutura. O sistema também é composto por um amplificador PA50, placa de aquisição MC3242 e quatro microfones, por onde a pressão sonora é captada. Além disso, utilizou-se um computador com o *software* VA-Lab4 licenciado na instituição de ensino, o programa utiliza a ISO 10534-2 para a realização dos cálculos. A Figura 58 apresenta os equipamentos utilizados e a montagem dos mesmos.

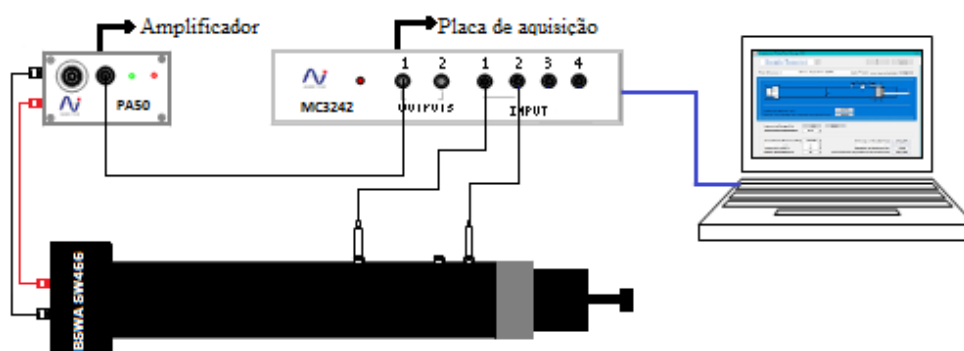


Figura 58 – Equipamentos utilizados nos ensaios experimentais.

A Figura 59 demonstra, de forma simplificada, os procedimentos comuns nas medições.

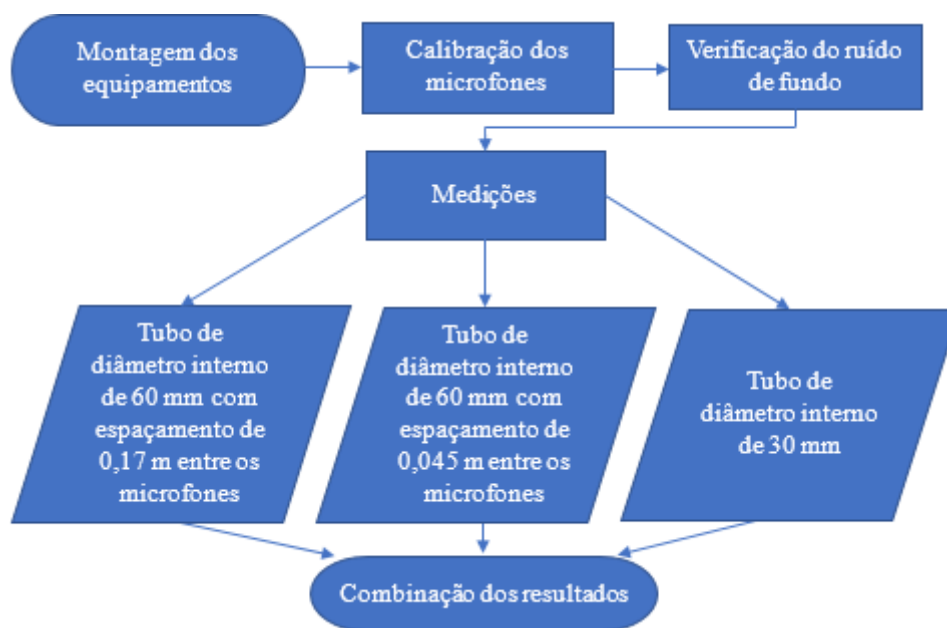


Figura 59 - Procedimento de medição simplificado.

4.3.1 Calibração dos microfones

O primeiro passo para a execução dos experimentos é a calibração dos microfones. Esse procedimento tem como intuito a verificação da sensibilidade de cada microfone. Calibra-se dois microfones para a medição do coeficiente de absorção sonora e quatro para perda de transmissão sonora.

Para a calibração utilizou-se a placa de aquisição e um calibrador CA115 (Figura 60 (a)) que emite um tom puro em 1000 Hz. A amplitude do sinal, conforme os fabricantes do calibrador, é de 114 dB e é dada pelo valor quadrático médio, RMS (*root medium square*). A Figura 60 (b) apresenta as configurações adotadas. Para cada microfone calibrado selecionou-se um canal na placa de aquisição e no *software* VA-Lab4. Após a calibragem os dados foram salvos.

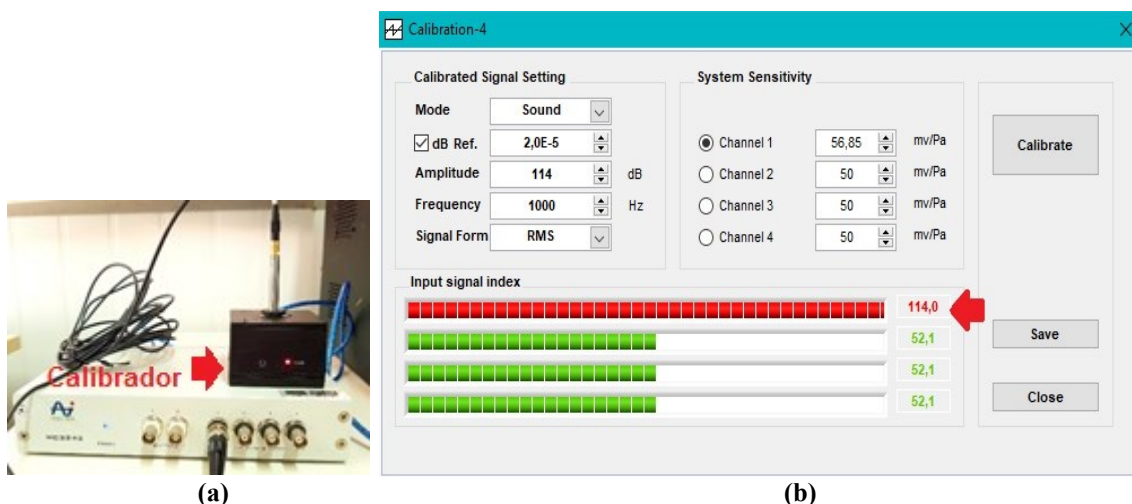


Figura 60 - Calibração dos microfones: (a) equipamentos (b) configuração no *software* VA-Lab4.

4.3.2 Verificação do ruído de fundo

Ruídos provenientes de fontes externas ao tubo de impedância podem causar alterações nos resultados finais. Com o intuito de verificar o ruído de fundo, nos dias em que se realizou os experimentos e com os equipamentos montados, o seguinte procedimento foi executado: com o amplificador desligado configurou-se o programa selecionando dois canais, modificou-se o filtro para linear e o detector para *slow* (ponderação temporal rápida), tal detector ou ponderação tem a função de reduzir as flutuações do ruído tornando-o visível. Após 60 segundos de verificação do ruído anotou-se o nível de pressão sonora máximo. A Figura 61 apresenta as configurações adotadas no *software*.

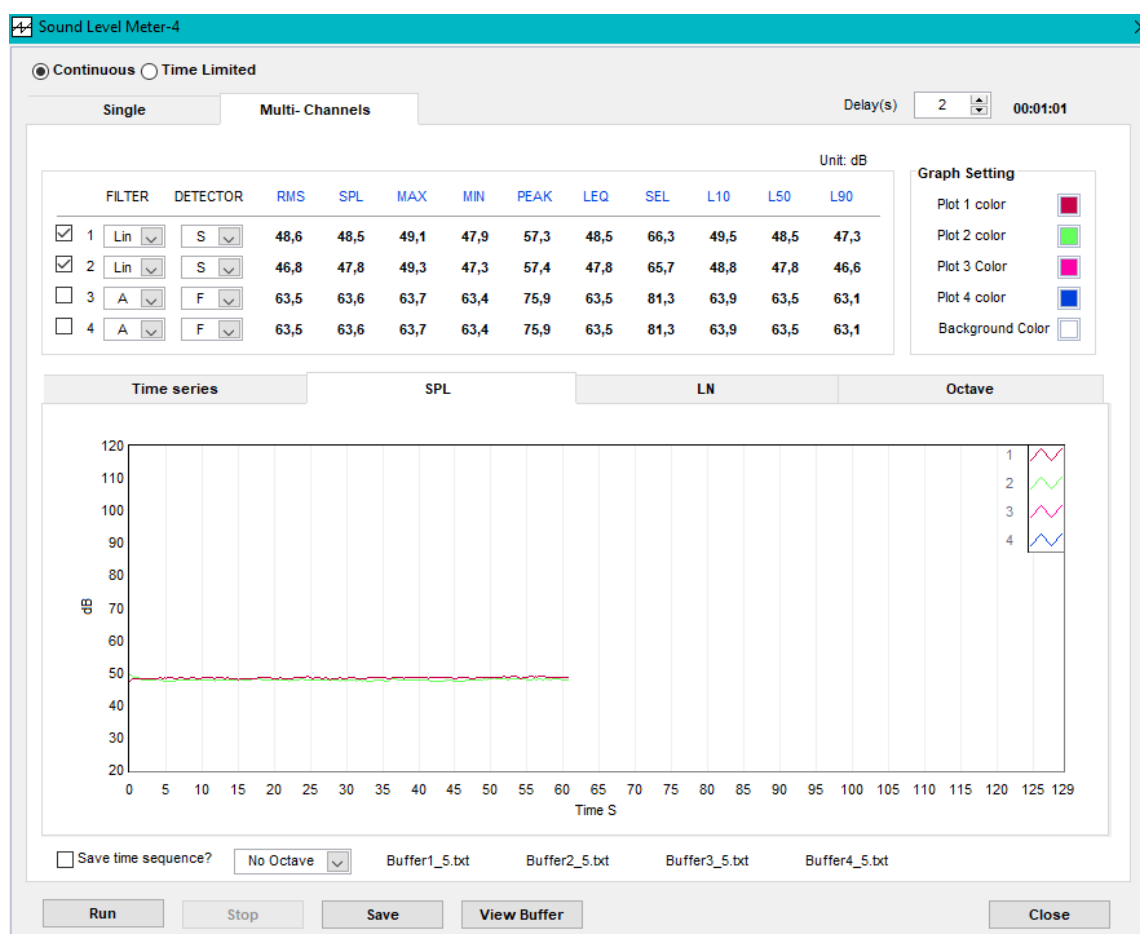


Figura 61 - Verificação do ruído de fundo.

4.3.3 Determinação do coeficiente de absorção sonora

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora utilizou-se dois tubos, com os diâmetros internos de 30 e 60 mm, uma fonte sonora acoplada ao tubo de 60 mm, dois microfones, amplificador, placa de aquisição e um computador onde instalou-se o *software* VA-Lab4 (Figura 62).

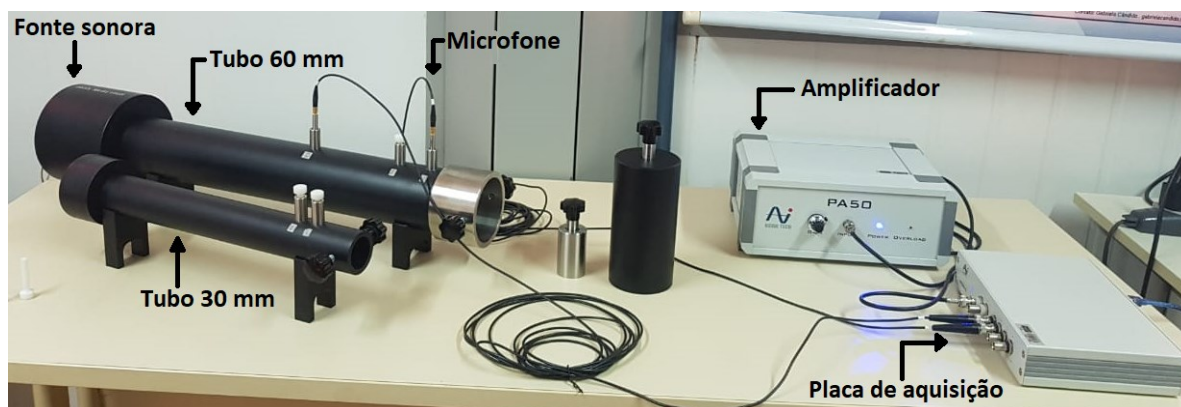


Figura 62 – Tubos e equipamentos empregados no procedimento experimental.

O emprego de dois tubos com diâmetros diferentes é necessário para que, após as medições, seja possível obter os coeficientes de absorção sonora em uma ampla faixa de frequência (100 a 6300 Hz).

Para a primeira medição utilizou-se o tubo de 60 mm e com o espaçamento entre os microfones de 170 mm. Antes de iniciar a medição selecionou-se o tubo desejado, para os valores de pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar considerou-se os valores padrões, 101325 Pa, 20 °C e 50%, respectivamente (Figura 63).

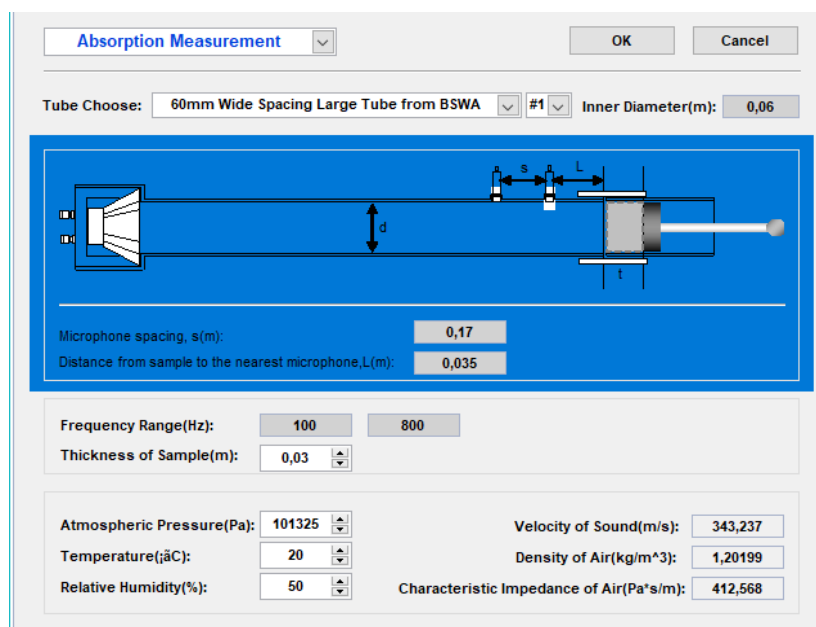


Figura 63 – Configuração do software VA-Lab4.

Configurado o programa inseriu-se a amostra no porta-amostra (Figura 64 (a)), posteriormente acoplou-se o mesmo no tubo de impedância (Figura 64 (b)). Verificou-se se o

microfone localizado no canal 1 da placa de aquisição estava na posição 0 do tubo e o microfone do canal 2 estava na posição 2 do tubo (Figura 64 (c)). Procedeu-se com a medição.

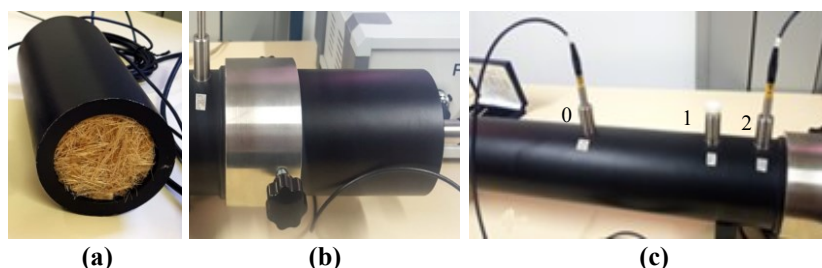


Figura 64 – Procedimento prévio às medições: (a) inserção da amostra no porta-amostra (b) introdução do porta-amostra no tubo (c) verificação da posição dos microfones.

Com os microfones na posição, iniciou-se as medições. Após 60 segundos finalizou-se a medição, trocou-se a posição dos microfones de forma que o microfone do canal 2 ficasse na posição 0 e o microfone do canal 1 ficasse na posição 2, após 60 segundos os resultados foram gerados. Como resultado final para cada amostra realizou-se a média entre três medições. A média é realizada pelo *software*. Esta posição de microfone gerou resultados na faixa de frequência de 100 a 800 Hz.

Conforme o fabricante do tubo de impedância é recomendado que as pressões sonoras nos microfones estejam entre 90 e 110 dB, o que pode ser controlado manipulando o amplificador. Além disso, durante as medições, a pressão sonora nos microfones deve ser, no mínimo, 10 dB superior a pressão sonora de ruído de fundo.

Para a análise na faixa de frequência de 400 a 2500 Hz realizou-se o experimento com a mesma amostra no tubo de 60 mm e com os microfones tendo o espaçamento de 15,00 mm. Inseriu-se o microfone do canal 1 do amplificador na posição 1 do tubo e do canal 2 na posição 2 (Figura 65). Modificou-se as configurações de forma que o espaçamento e a faixa de frequência de análise fossem alteradas. Repetiu-se o procedimento de medição.

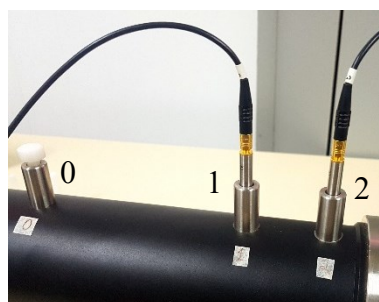


Figura 65 - Troca da posição dos microfones.

Utilizou-se o tubo com 30 mm de diâmetro interno para obter resultados na faixa de frequência de 1000 a 6300 Hz. Para esta análise acoplou-se o tubo de 30 mm no tubo de 60 mm (Figura 66), pois o tubo de 30 mm não possui uma fonte sonora. Colocou-se os microfones nos pontos de inserção do tubo de 30 mm e, nas configurações, alterou-se o tipo de tubo utilizado. Repetiu-se o procedimento de medição.

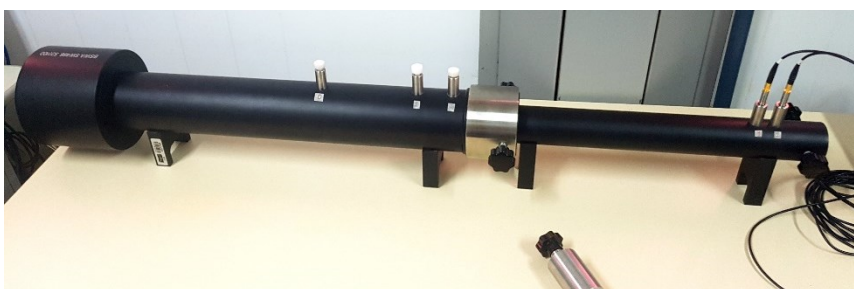


Figura 66 – Medição com o tubo de 30 mm de diâmetro interno.

Ao fim dos dois experimentos com o tubo de diâmetro interno de 60 mm e o experimento com o tubo de 30 mm, combinou-se os resultados no *software* VA-Lab4, para os intervalos de mesma frequência realizou-se a interpolação entre os valores. Após a junção salvou-se os coeficientes de absorção sonora em bandas de um terço de oitava de 100 a 6300 Hz.

4.3.4 Determinação da perda de transmissão sonora

Para determinar a perda de transmissão utilizou-se quatro microfones, amplificador, placa de aquisição e um computador com o *software* VA-Lab4 e quatro tubos, sendo 2 com diâmetro interno de 60 mm e dois com 30 mm.

Na primeira medição utilizou-se os tubos de 60 mm. Para a verificação da perda de transmissão de materiais uma amostra do mesmo é inserida entre dois tubos (Figura 67 (a)) de mesmo comprimento e diâmetro interno. Para a primeira medição, após inserir a amostra, acoplou-se os dois tubos e inseriu-se os microfones nas posições 0 2, 3 e 5 (Figura 67 (b)). Antes de iniciar a medição selecionou-se, nas configurações do *software*, o tubo desejado e verificou-se se a opção Perda de transmissão estava selecionada. Primeiramente, deixando aberto o lado oposto a fonte sonora (fim do tubo), a medição foi iniciada, esperou-se 60 segundos, fechou-se o tubo, realizou-se uma nova medição e gerou-se os resultados.



Figura 67 - Procedimento prévio às medições: (a) inserção da amostra no tubo (b) acoplamento dos tubos e verificação da posição dos microfones.

De forma análoga ao que se realizou para a determinação do coeficiente de absorção sonora, para obter os resultados da perda de transmissão na faixa de frequência de 400 a 2500 Hz realizou-se o experimento com a mesma amostra, com os tubos com diâmetro de 60 mm alterando a localização dos microfones para as posições 1, 2, 3 e 4 e, nas configurações do *software*, modificou-se o espaçamento entre os microfones. Repetiu-se o procedimento de medição.

Utilizou-se os tubos com 30 mm de diâmetro interno para obter resultados na faixa de frequência de 1000 a 6300 Hz. Para esta análise conectou-se os tubos de 30 mm já com a amostra entre eles e, posteriormente, acoplou-se a junção ao tubo de 60 mm onde está localizada a fonte sonora (Figura 68). Para esta análise colocou-se os quatro microfones nos pontos de inserção dos tubos de 30 mm e, nas configurações, alterou-se o tipo de tubo utilizado. Repetiu-se o procedimento de medição.



Figura 68 - Acoplamento dos tubos e inserção dos microfones nas posições.

Ao fim dos dois experimentos com os tubos de diâmetro interno de 60 mm e o experimento com os tubos de 30 mm os resultados foram combinados no *software* VA-Lab4, para os intervalos de mesma frequência realizou-se a interpolação entre os valores. Após a

junção os resultados de perda de transmissão sonora foram salvos em bandas de um terço de oitava de 100 a 6300 Hz.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o intuito de verificar a significância das amostras realizou-se a análise estática. A análise de variância foi realizada no software Excel. Para a comparação das médias utilizou-se o teste de Tukey, executado no *software* Minitab versão 17. Tendo este estudo obtido os coeficientes de absorção e perda de transmissão sonora em bandas de 100 a 6300 Hz, para o cálculo das médias considerou-se as 3 réplicas de uma mesma amostra e na mesma frequência. Para todas as análises foram consideradas as mesmas frequências, ou seja, a média da amostra A1, em 100 Hz, foi comparada com as amostras da mesma configuração e na mesma frequência. Em todas as análises considerou-se o nível de significância de 0,05.

4.5 MODELO NUMÉRICO

A metodologia consistiu na validação de um modelo numérico em método dos elementos finitos (MEF) de um tubo de impedância com uma amostra inserida em uma das extremidades. Para isso, captou-se a pressão sonora em pontos predeterminados, sendo tais pontos a localização de inserção dos microfones.

Realizou-se a modelagem do tubo no *software* ANSYS® *Workbench* 17.0 licenciado na instituição de ensino. Posteriormente a captação da pressão sonora, exportou-se os dados para o *software* MATLAB®, onde calculou-se os coeficientes de absorção sonora por meio da Eq. (9).

Para a validação do modelo inseriu-se, em uma das extremidades do tubo, a impedância de uma amostra confeccionada no procedimento experimental. A impedância foi obtida no *software* VA-Lab4. Para a validação utilizou-se as amostras A1 e B8, a escolha foi realizada de forma aleatória.

Para o cálculo do coeficiente de absorção sonora simulou-se dois tubos similares aos modelos SW466 empregados no procedimento experimental, a utilização de ambos os tubos é necessária para que uma ampla faixa de frequência seja analisada. A Figura 69 (a) e (b) apresenta os tubos simulados e as dimensões, em milímetros, empregadas na simulação.

Denominou-se o tubo com 400 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro de tubo 1 e o com 500 mm de comprimento e 60 mm de diâmetro de tubo 2.

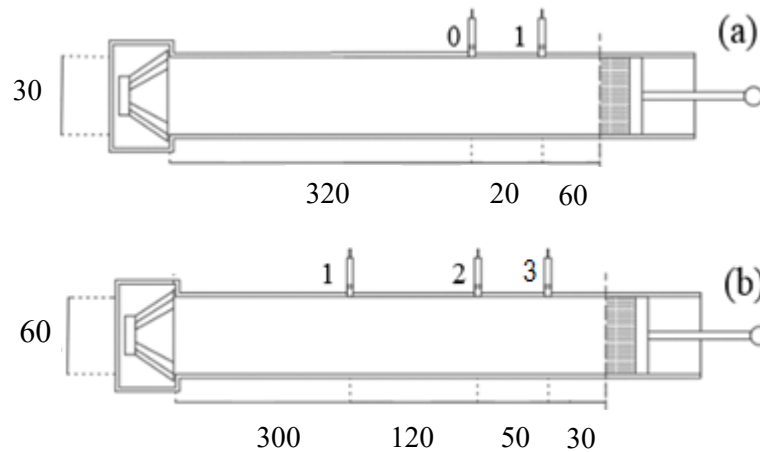


Figura 69 – Dimensões, em mm, utilizadas na simulação numérica para os tubos: (a) 1 (b) 2.

Considerou-se 3 casos, sendo um no tubo 1 e dois no tubo 2. A distinção entre cada caso do tubo 2 é pela localização dos microfones, adotou-se as mesmas posições dos microfones do procedimento experimental. A distância entre os microfones do caso 2 e a fonte sonora é de 300, 420 e 470 mm, para os microfones 1, 2 e 3, respectivamente. A Tabela 11 apresenta os casos simulados, os espaçamentos entre os microfones e as frequências mínimas e máximas de cada simulação. As frequências foram calculadas conforme as Eq. (16) e Eq. (17), desenvolvidas por Bóden e Abon (1984).

$$f_{min} = \frac{0.1C}{2S} \quad (16)$$

$$f_{max} = \frac{0.8C}{2S} \quad (17)$$

onde C é a velocidade do som (m/s) e considerada como 343 e S o espaçamento, em metros, entre os microfones.

Tabela 11 – Casos simulados, espaçamentos entre os microfones e faixa de frequência.

Tubo	Caso	Microfones	Espaçamento entre os microfones (mm)	f _{mín} (Hz)	f _{máx} (Hz)
1	1	0 - 1	20	858	6860
2	2	1 - 3	170	100	807
	3	2 - 3	50	343	2744

No primeiro passo da simulação construiu-se um tubo de seção circular, onde o diâmetro do círculo foi esboçado nos eixos XY e o comprimento foi esboçado ao longo do eixo Z (Figura 70).

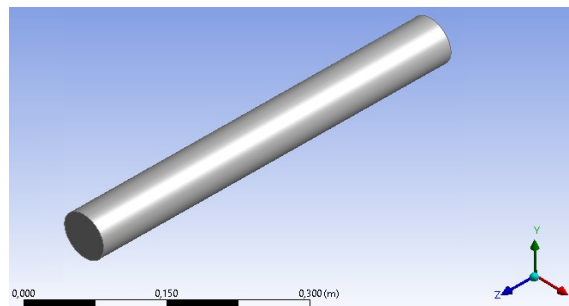


Figura 70 - Modelo geométrico do interior do tubo de impedância.

Posteriormente à confecção da geometria, aplicou-se uma malha sobre o tubo. Para a determinação dos tamanhos da malha em que os tubos foram discretizados utilizou-se a Eq. (18) de Howard e Cazzolato (2014).

$$esize = \frac{C}{fc} * \frac{1}{epw} \quad (18)$$

sendo C a velocidade do som, adotado como 343 m/s, epw a quantidade de nós por comprimento de onda, considerado igual a 20 e fc a frequência de corte, calculada conforme a Eq. (4) e tendo como resultado 6696 para o tubo de 30 mm e 3348 para o tubo de 60 mm.

Após a resolução da Eq. (18), obteve-se os resultados 0,002 e 0,005 m para o tubo de 30 e 60 mm de diâmetro, respectivamente. O valor encontrado representa a dimensão máxima aceitável para cada elemento da malha. Para ambos os tubos, foi considerado o tamanho de 0,002 m, valor inferior ao calculado.

Para garantir que o tamanho definido para cada elemento apresenta resultados confiáveis, além da determinação do tamanho de cada elemento por meio da Eq. (18), realizou-se a convergência de malha para os dois tubos simulados. Primeiramente, realizou-se a convergência do tubo de 60 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento. Iniciou-se a simulação com os elementos possuindo 0,1 m, com esse tamanho o tubo foi discretizado em 20 elementos. Posteriormente, diminuiu-se o tamanho da malha em intervalos de 0,01 m, até atingir o tamanho de 0,002 m, com os elementos possuindo esse tamanho o tubo foi discretizado em 207250 elementos.

Para a convergência do tubo de 30 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento, iniciou-se a simulação com cada elemento possuindo 0,01 m e com o tubo discretizado em 800 elementos. Diminuiu-se o tamanho da malha em intervalos de 0,01, até atingir o tamanho de 0,001 m e como tubo dividido em 634000 elementos.

A malha aplicada no tubo possui elementos hexaédrico do tipo FLUID30 (Fluido acústico 3D), o mesmo é utilizado para análise acústica de seções em 3D com 8 nós tendo cada nó 4 graus de liberdade (deslocamento em x, y, z e pressão sonora). A Figura 71 apresenta o tubo com a malha gerada pelo MEF.

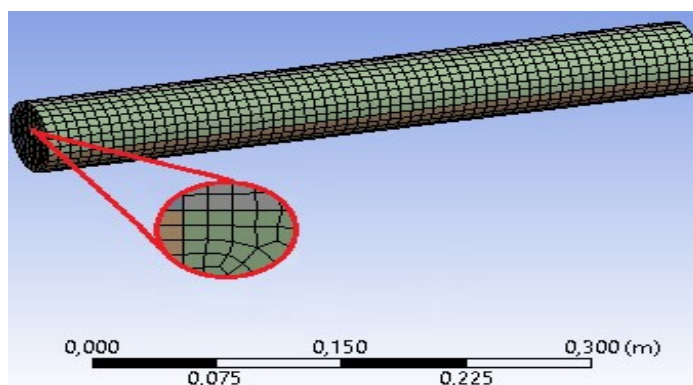


Figura 71 - Tubo discretizado por MEF.

Na simulação numérica a fonte sonora localizada em uma das extremidades do tubo é representada como uma excitação que movimenta o fluido na posição onde é inserida. Para a representação da fonte sonora, no *software* ANSYS® *Workbench*, selecionou-se a excitação *mass source*. Para a inserção da impedância de cada amostra selecionou-se a condição de contorno *impedance boundary*. A Figura 72 apresenta as condições de contorno inseridas no tubo de impedância.

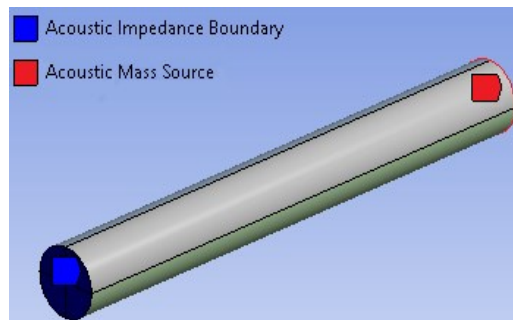


Figura 72 - Condições de contorno aplicadas no tubo de impedância.

Para a inserção da impedância, nas definições da condição de contorno *Impedance Boundary* (Figura 73 (a)), considerou-se que a impedância depende da frequência (Figura 73 (b)), e então, inseriu-se a parte real (resistência) e a imaginária (reatância) da impedância (Figura 73 (c)).

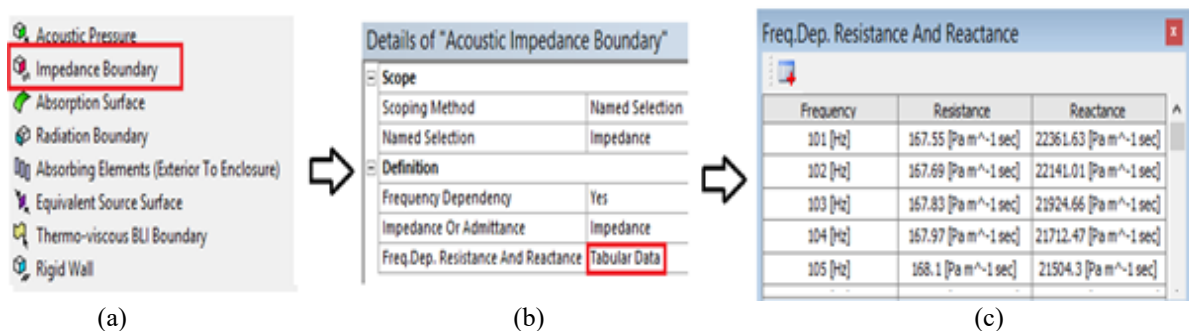


Figura 73 – Condição de contorno *Impedance Boundary*: (a) seleção (b) indicação da impedância dependendo da frequência (c) inserção dos dados.

Além das condições de contorno indicadas na Figura 72, aplicou-se sobre toda a geometria do tubo um corpo acústico por meio da seleção de *Acoustic Body*.

Definidas as condições de contorno é possível obter a pressão sonora nos pontos predefinidos para cada caso. Na simulação numérica, tendo determinado o ponto no eixo z, selecionou-se todos os nós neste ponto ao longo do eixo XY (Figura 74), sendo estes nós os locais de captação da pressão sonora.

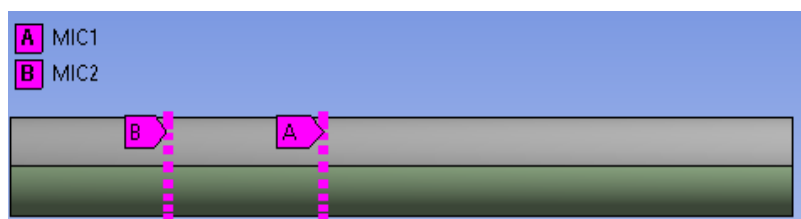


Figura 74 – Seleção dos nós para captação da pressão sonora.

No software Ansys foram obtidos os resultados de pressão sonora (real e imaginária) pela faixa de frequência para cada caso. Após a aquisição dos resultados os dados foram processados no *software* MATLAB®, para cada amostra estudada (A1 e B8) realizou-se a execução dos 3 casos mencionados na Tabela 11. Ao fim do procedimento, criou-se um gráfico que exibe os coeficientes de absorção sonora pela faixa de frequência de 100 a 6300 Hz em bandas de um terço de oitava.

Este estudo é composto pela metodologia experimental e numérica. Na experimental confeccionou-se amostras utilizando a fibra extraída do pseudocaule da bananeira e desenvolveu-se, também, amostras de painéis sanduiches utilizando a fibra como camada interna. De posse da impedância das amostras, obtidas no *software* VA-Lab4, validou-se um modelo numérico de um tubo de impedância desenvolvido no *software* ANSYS® *Workbench*.

Os resultados foram apresentados em duas seções: metodologia experimental e metodologia numérica. Na primeira seção, metodologia experimental, apresentou-se os coeficientes de absorção sonora e os NRC das amostras A, B, C e D, a perda de transmissão das amostras B e D e a interação entre os diferentes fatores empregados no planejamento fatorial. Na metodologia numérica exibiu-se a convergência de malha para os dois tubos simulados e validou-se o modelo comparando-se os resultados dos coeficientes de absorção sonora gerados na metodologia numérica com os da experimental.

5.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

As amostras desenvolvidas no procedimento experimental foram submetidas ao ensaio no tubo de impedância. Os coeficientes de absorção sonora e a perda de transmissão sonora foram adquiridos no *software* VA-Lab4 e foram gerados em bandas de frequências de um terço de oitava de 100 a 6300 Hz. Para a verificação do desempenho das amostras de uma mesma configuração, juntou-se todos os resultados em um gráfico criado no *software* MATLAB®.

5.1.1 Coeficiente de absorção sonora

Verificou-se o coeficiente de absorção sonora de todas as amostras confeccionadas nas bandas de um terço de oitava de 100 a 6300 Hz. A Figura 75 mostra os coeficientes de absorção sonora em função da faixa de frequência das amostras A (configuração 1). Por meio da análise da figura percebe-se que nas bandas de 100 a 2000 Hz a amostra A7 demonstrou a melhor

absorção, seguida da amostra A5 que possui a mesma densidade e comprimento das fibras da amostra A7, sendo 120,00 kg/m³ e 10,00 mm, respectivamente.

Além disso, verifica-se por meio da Figura 75 que acima de 2000 Hz as amostras A7 e A8 apresentaram os melhores resultados, chegando ao coeficiente de 0,9 em 6300 Hz. Ambas as amostras possuem como semelhança as espessuras e densidades, sendo 10,00 mm e 120,00 kg/m³, respectivamente. As amostras A1 e A2, que possuem 7,00 mm de espessura, 80,00 kg/m³ e o comprimento da fibra de 10,00 e 70,00 mm, respectivamente, demonstraram os coeficientes mais baixos em toda a faixa de frequência.

Percebe-se que até 1600 Hz os resultados obtidos com todas amostras foram semelhantes e baixos, tendo como coeficiente máximo aproximadamente 0,21. Nesta faixa de frequência observa-se que as amostras A3, A5 e A7 que tem a fibra com o mesmo comprimento (10,00 mm) demonstraram desempenho superior em relação as demais. Acima de 2000 Hz as amostras com a menor espessura (7,00 mm) e densidade (80,00 kg/m³) apresentaram os menores resultados e as amostras A7 e A8 com maior espessura (10,00 mm) e densidade (120,00 kg/m³) os coeficientes superiores, chegando aos coeficientes de 0,78 e 0,89, respectivamente, em 6300 Hz.

Os resultados das amostras A indicaram que as amostras com a maior espessura e densidade apresentam coeficientes mais elevados, tal resultado é frequentemente encontrado em estudos que avaliam o aumento da espessura e densidade de materiais, como pode ser verificado nos trabalhos de Vieira (2008) e Xiang et al. (2013).

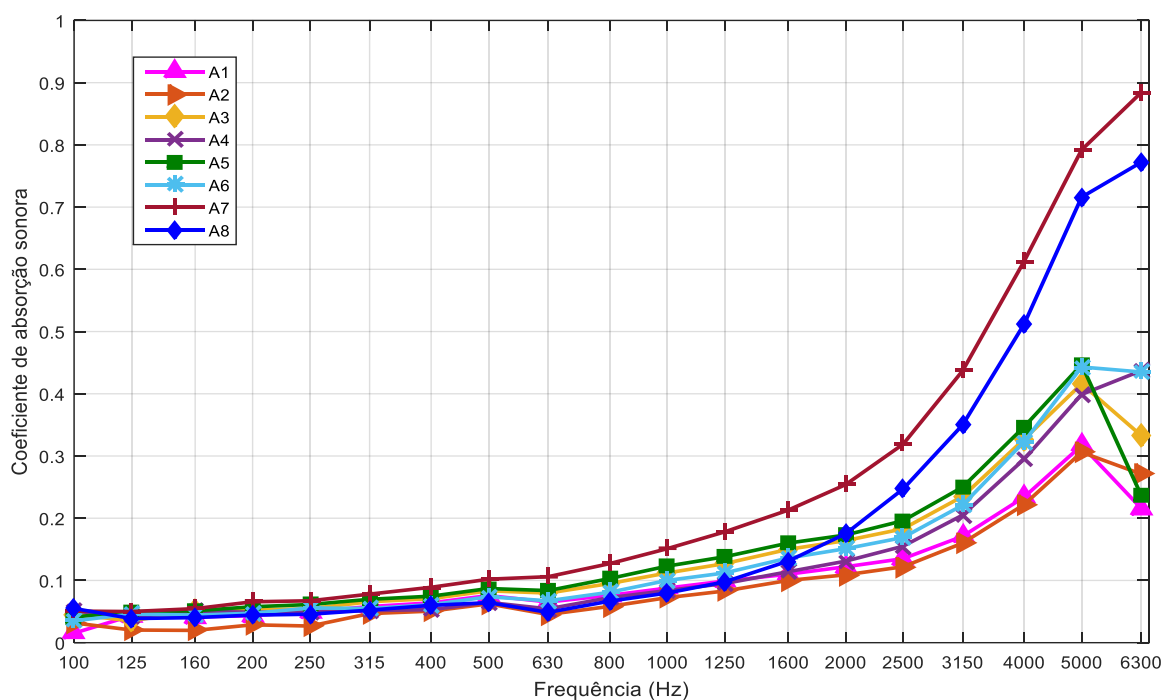


Figura 75 - Coeficientes de absorção sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras A (configuração 1).

Os resultados da análise estatística, disponível no Apêndice C, demonstraram que até as bandas de 1/3 de oitava de 160 Hz todas amostras possuem a mesma significância, visto que as médias são iguais. Além disso, verifica-se que a amostra A7 é a que possui a maior significância e a amostra A2 a menor. Tal análise comprova que a amostra A7 é a que possui maior potencial para possíveis aplicações.

A Figura 76 apresenta uma comparação entre os resultados das amostras B (configuração 2), as mesmas foram construídas em formato de painéis sanduíches constituídos pela camada interna de fibra e as externas de gesso. Após a análise da figura percebe-se na faixa de 100 a 250 Hz todas as amostras demonstraram baixo desempenho de absorção sonora, sendo que, a amostra B7 que possui a densidade de 120,00 kg/m³ e as camadas de gesso e de fibra possuindo 5,00 mm e 10,00 mm, respectivamente, demonstrou os coeficientes mais altos.

Na faixa de frequência de 250 a 1250 Hz a amostra B1 obteve a melhor absorção, demonstrando coeficientes que variam de 0,15 a 0,38, tal amostra é formada por uma camada de gesso com 5,00 mm, a camada de fibra com 7,00 mm de espessura e 80,00 kg/m³ de densidade.

De 1250 a 6300 Hz todas as amostras demonstraram coeficientes de absorção sonora similares e baixos, intercalando de aproximadamente 0,06 a 0,23. Dentro desta faixa de

frequência, em cada banda de oitava analisada percebe-se que o desempenho das amostras foi variado: a amostra B7 obteve a melhor absorção de 1600 a 2000 Hz, no entanto em 2500 Hz teve desempenho similar a B8, de 2500 a 6300 Hz as amostras B3 e B7 que possuem as camadas de gesso e fibra similares demonstraram resultados similares.

Com exceção das bandas de 160 a 250 Hz, nota-se que em todas as bandas de frequências estudadas as amostras formadas pela camada de gesso de 7,50 mm teve os menores coeficientes de absorção sonora. Tal fato pode ser verificado com os resultados da amostra B2, que teve como maior coeficiente 0,20.

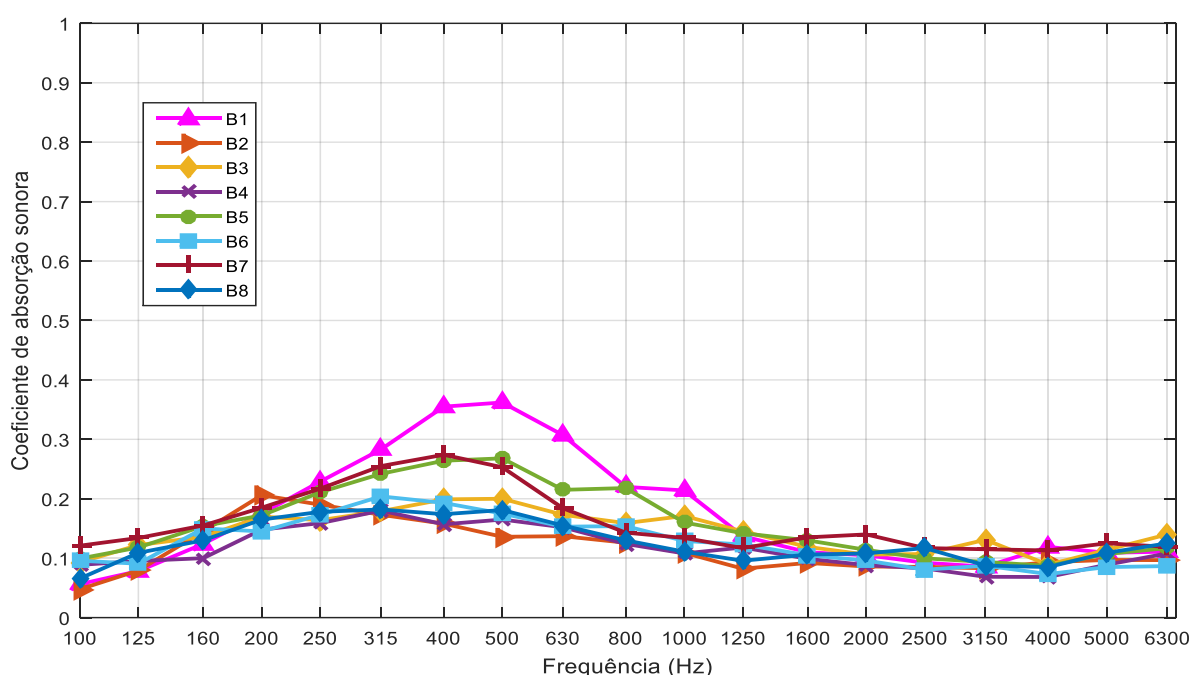


Figura 76 - Coeficientes de absorção sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras B (configuração 2).

Conforme os resultados da análise estatística das amostras da configuração 2, disponível no apêndice C, observa-se que em quase todas as bandas de frequências as médias das amostras são similares (considerando o nível de significância de 95%). No entanto, nas bandas onde houve divergência de médias (400, 500 e 1000 Hz) a amostra B1 demonstrou maior significância em relação as demais, e a amostra B6 obteve a menor significância.

O resultado da análise estatística, bem como dos seus coeficientes de absorção sonora disponíveis na Figura 76, confirma que a amostra B1 é a que demonstrou maior potencial para possíveis aplicações acústica.

Para a verificação se a fibra inserida no interior do painel sanduíche proporcionou melhoria nos resultados, comparou-se as amostras B7 e B8 com painéis de mesma espessura e sem preenchimento interno. A Figura 77 demonstra a comparação entre as amostras escolhidas e dois painéis fabricados com as camadas de gesso possuindo 5,00 e 7,50 mm de espessura e sem preenchimento interno. Por meio da figura percebe-se que a amostra B7, que possui as camadas de gesso com 5,00 mm de espessura, apresentou resultados superiores ao painel de 5,00 mm sem preenchimento interno até as bandas de frequências de 3150 Hz, após essa frequência o painel sem a camada interna de fibra exibiu resultados superiores. Comparando-se a amostra B8 com o painel formado pelas camadas de gesso de 7,50 mm percebe-se que a amostra B8 demonstrou resultados superiores até as bandas de frequências de 315 Hz e de 1600 a 6300 Hz.

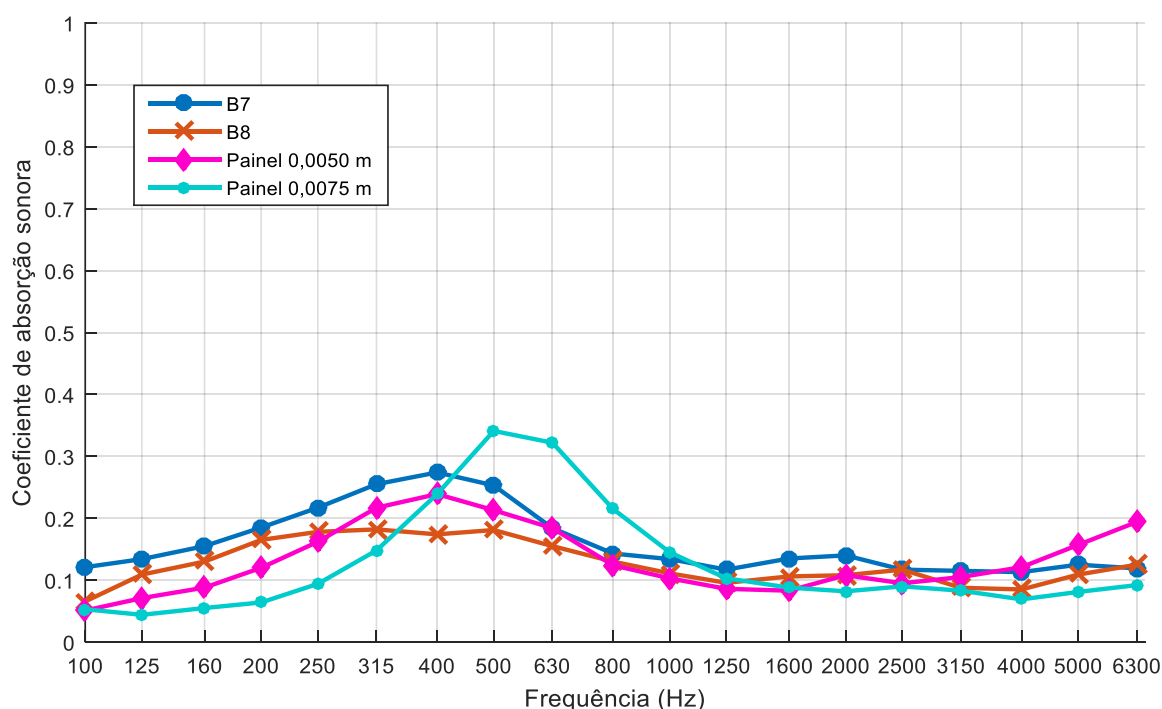


Figura 77 - Comparação entre as amostras B7 e B8 e dois painéis de gesso com diferentes espessuras e com o interior sem preenchimento.

A Figura 78 exibe os resultados das amostras confeccionadas com a fibra extraída do pseudocaule da bananeira e a cola natural fabricada com água e polvilho. A partir da análise da figura percebe-se que nas bandas de 100 a 800 Hz todas as amostras desenvolvidas demonstraram baixo potencial de absorção sonora, apresentando coeficientes de absorção sonora inferior a 0,10. Nas bandas de 800 a 3150 Hz a amostra C8 obteve resultados superiores

as demais, tal amostra possui a espessura de 10,00 mm, a densidade de 120,00 kg/m³ e as fibras com 70,00 mm. Além disso, em frequências acima de 3150 Hz as amostras C8 e C7 obtiveram desempenho similar, ambas as amostras possuem a mesma densidade e espessura.

Percebe-se a partir da Figura 78 que as amostras C1 a C4 e C5 a C8, que possuem a mesma densidade, demonstraram resultados semelhantes. Sendo que, a densidade de 120,00 kg/m³ exibiu resultados superiores a densidade de 80,00 kg/m³. Além disso, a amostra com maior potencial de absorção sonora, foi a amostra C8, obtendo o coeficiente máximo de 0,80 e a amostra com o menor potencial foi a C1, tendo o coeficiente máximo de aproximadamente 0,15.

A partir dos resultados verifica-se, também, que o aumento no comprimento da fibra de 10,00 (amostra C1, C3, C5 e C7) para 70,00 mm (amostra C2, C4, C6 e C8) e da espessura da amostra de 7,00 (amostra C1, C2, C5 e C6) para 10,00 mm (amostra C3, C4, C7 e C8) acarretou em uma pequena melhoria nos resultados. A constatação de que os aumentos desses fatores causaram melhoria nos resultados é apresentado nos resultados do planejamento fatorial.

Assim como verificado e comentado nos resultados das amostras A, com os coeficientes de absorção sonora das amostras C verifica-se que o aumento da densidade do material influencia significativamente na absorção sonora do material.

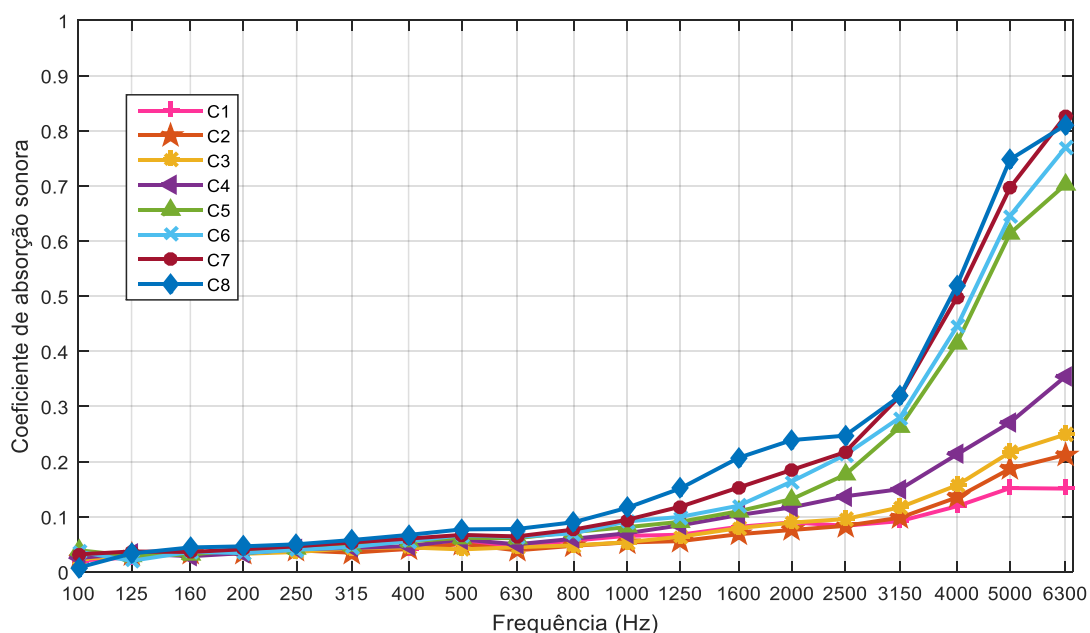


Figura 78 - Coeficientes de absorção sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras C (configuração 3).

De acordo com a análise estatística das amostras da configuração 3, disponível no apêndice C, constata-se que, de maneira geral, as médias apresentaram divergências. No entanto, a amostra C7 foi a que demonstrou maior significância e a C3, na maior parte das frequências, a menor.

Além disso, a análise estatística indica que a amostra C7 possui maior significância do que a amostra C8, embora a última amostra citada possui coeficientes de absorção sonora superiores a C7. Portanto, das amostras C, a mais indicada para possíveis aplicações acústicas é a C7.

Semelhante ao que ocorreu nas amostras A e C, pelos resultados de absorção sonora das amostras D, demonstrados na Figura 79, verifica-se que em baixas frequências todas as amostras obtiveram baixos coeficientes. A partir de 1000 Hz observa-se um aumento nos coeficientes e percebe-se que, a partir dessa frequência, os resultados apresentaram distinções.

Na frequência de 1250 Hz verifica-se que as amostras com a mesma espessura de gesso demonstraram resultados semelhante. As amostras pares, que são constituídas pelas camadas de gesso possuindo 7,50 mm de espessura, demonstraram coeficientes superiores as ímpares, que possuem as camadas com 5,00 mm. No entanto, em 1600 Hz, com exceção da amostra D1, todas obtiveram resultados similares.

A amostra D1, constituída pela camada de gesso com a espessura de 5,00 mm e a de fibra com 7,00 mm e densidade da amostra de fibra de 80,00 kg/m³, demonstrou desempenho inferior as demais nas bandas de frequências de 100 a 1600 Hz. Entretanto, nas bandas de 2500 a 6300 Hz, obteve o melhor desempenho.

Nas bandas de 100 a 800 Hz a amostra D4, formada pela camada de gesso com 7,50 mm de espessura e a de fibra com 10,00 mm e a densidade da amostra de fibra de 80,00 kg/m³, obteve os melhores coeficientes. No entanto, nas bandas de 2000 a 5000 Hz teve os menores coeficientes.

Mediante a análise dos coeficientes de absorção sonora das amostras D, observa-se que diferentes espessuras de camada de gesso geram bons resultados em diferentes faixas de frequência. Portanto, é notório que, para a escolha de um material para possíveis aplicações, é necessário observar a faixa de frequência do local onde deseja-se aplicar o material e então definir a espessura da camada de gesso.

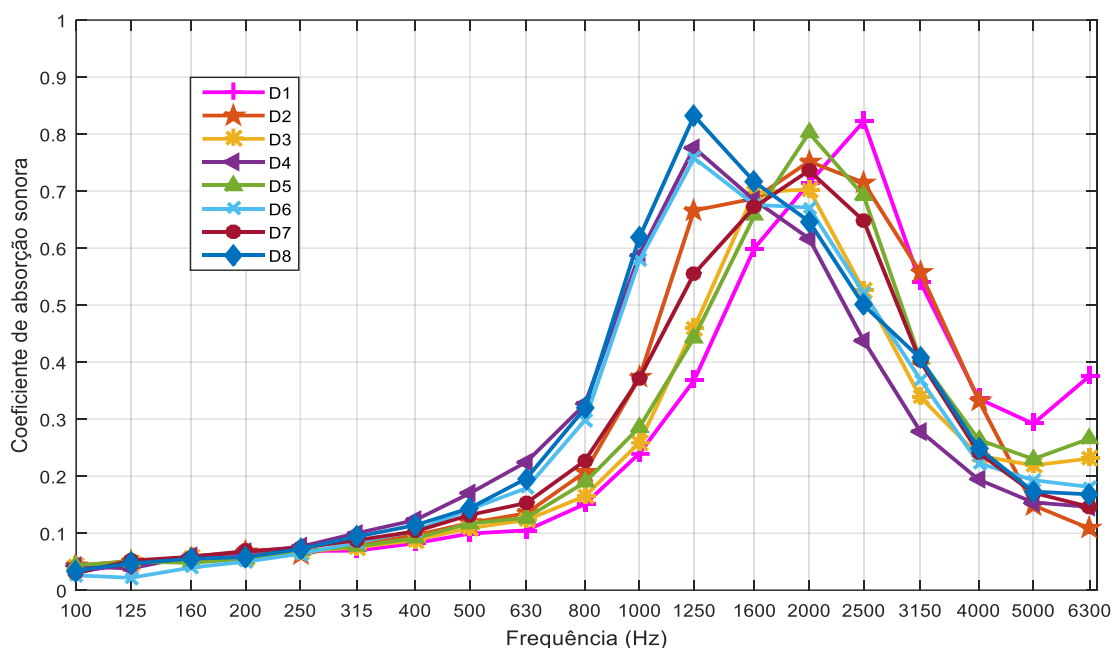


Figura 79 - Coeficientes de absorção sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras D (configuração 4).

Por intermédio dos resultados da análise estatística das amostras da configuração 4, disponível no Apêndice C, verifica-se que até a banda de 1/3 de oitava de 250 Hz todas as médias são iguais. Além disso, percebe-se que até a banda de 1000 Hz e em 1600 Hz a amostra D4 obteve a maior significância, em 1250 e 2000 Hz as amostras D8 e D5 são mais significativas, respectivamente, e de 2500 a 6300 Hz a D1 é mais significativa. No entanto, analisando-se a amostra com menor significância, têm-se que: até 1250 Hz é a amostra D1 e de 2500 a 6300 Hz é a D4.

Com base nos resultados da análise estatística verifica-se que a escolha por uma amostra para uma possível aplicação dependerá da faixa de frequência desejada, visto que cada amostra demonstrou potencial de absorção sonora em uma banda específica.

Para a verificação se as amostras fabricadas provocou alterações nos resultados dos painéis sanduíches, comparou-se os melhores resultados das amostras D com um painel sanduíche com o interior sem preenchimento. Por possuir as camadas de gesso com a mesma espessura, comparou-se a amostra D1 com o painel de 5,00 mm e a amostra D8 com o painel de 7,50 mm.

Mediante a análise da Figura 80 percebe-se que a inserção da amostra de fibra no interior do painel modificou o desempenho dos mesmos. Observa-se que o painel com espessura de 5,00 mm sem preenchimento obteve melhor absorção do que a amostra D1 nas faixas de

frequências de 100 a 1000 Hz e de 3150 a 5000 Hz. Entretanto, a amostra D1 apresentou desempenho superior ao painel de 5,00 mm nas faixas de 1250 a 3150 Hz e em 6300 Hz. Observa-se que a inserção da camada de fibra de 7,00 mm de espessura e 80,00 kg/m³ de densidade no painel de gesso possuindo 5,00 mm de espessura (amostra D1) melhorou a absorção sonora do painel em aproximadamente 86% em 2500 Hz.

A amostra D8, que possui a densidade de 120,00 kg/m³ e a camada de fibra e de gesso com 10,00 e 7,50 mm de espessura, respectivamente, demonstrou coeficientes superiores ao painel sem preenchimento nas bandas de 1000 a 1600 Hz e de 4000 a 6300 Hz. Nas bandas de 2000 a 3150 Hz o painel sem a fibra obteve melhor desempenho acústico. A amostra de fibra inserida no interior do painel melhorou a absorção sonora em aproximadamente 77% em 1250 Hz.

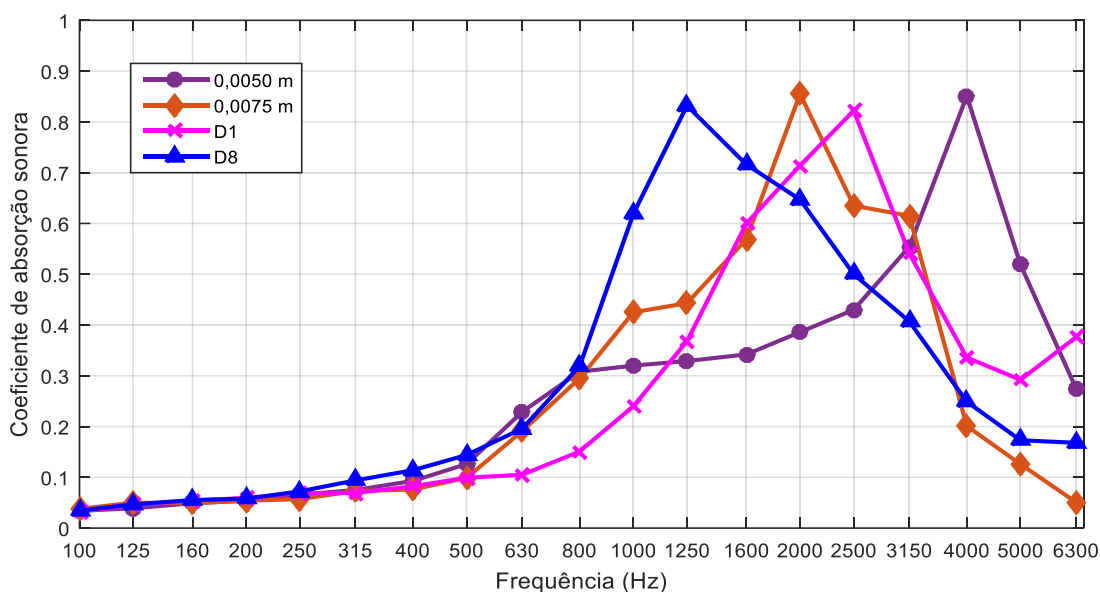


Figura 80 - Comparação entre as amostras D1 e D8 e dois painéis de gesso com diferentes espessuras e com o interior sem preenchimento.

Com o intuito de verificar se as amostras desenvolvidas neste estudo apresentaram potencial para a absorção acústica, os coeficientes das amostras A7 e C7 (10,00 mm de espessura e 120,00 kg/m³ de densidade) que demonstraram o melhor desempenho perante as amostras da mesma configuração, foram comparadas com a fibra de vidro (50 mm de espessura e 40,00 kg/m³) e dois materiais naturais: fibra de sisal (50,00 mm de espessura e 120,00 kg/m²) e coco (50 mm de espessura e 130,00 kg/m³), apresentados na Figura 81. As amostras B e D

não foram empregadas para a comparação, pois foram criadas somente como forma de aplicação das amostras A e C.

A partir da Figura 81 percebe-se que, nas bandas de frequências de 100 a 4000 Hz, as amostras desenvolvidas neste estudo demonstraram desempenho inferior aos materiais comparados. Em bandas de frequências acima de 4000 Hz as amostras A7 e C7 obtiveram desempenho superior a fibra de coco.

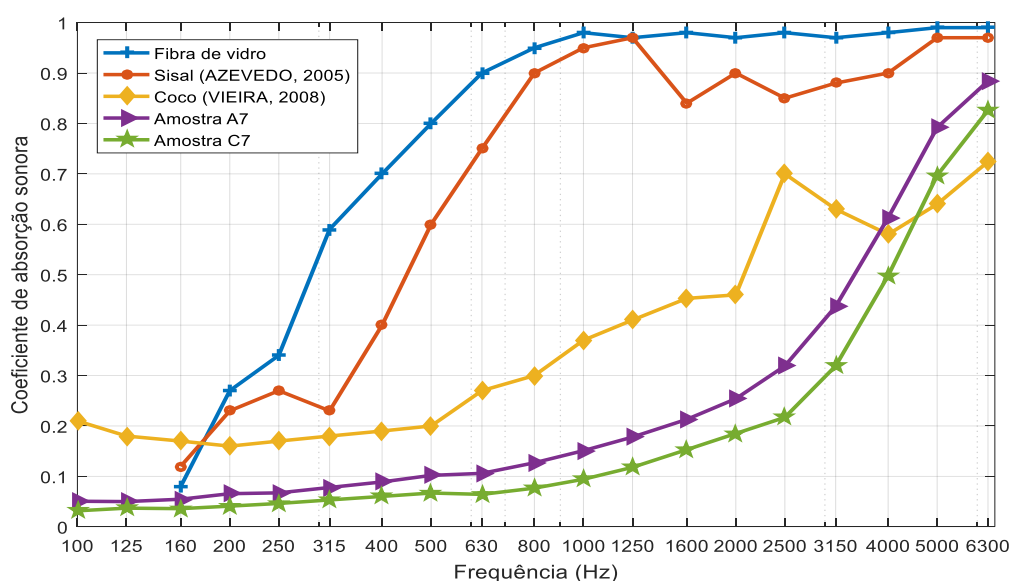


Figura 81 – Comparação entre os coeficientes de absorção sonora das amostras A7 e C7, da fibra de vidro, sisal e coco.

5.1.2 Noise Reduction Coefficient (NRC)

De posse dos coeficientes de absorção sonora das amostras calculou-se, de acordo com a Eq. 9 apresentada no referencial teórico, os NRC de cada amostra ensaiada. Tendo realizado a confecção de 3 réplicas para cada tipo de amostra, calculou-se a média aritmética entre as bandas de frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz, formando um valor unitário e, a partir do valor da média, calculou-se o NRC da amostra.

A Tabela 12 apresenta os NRC calculados para cada amostra A. A partir dos resultados percebe-se que, similar ao que foi apresentado após a análise nas bandas de 100 a 2000 Hz da Figura 75, a amostra A7 obteve o melhor desempenho de absorção sonora, com o NRC de 0,146. A amostra A2 o menor, tendo o NRC de 0,067. Além disso, pelos resultados, observa-se que as amostras ímpares, confeccionadas com a fibra tendo 10,00 mm de comprimento, demonstraram resultados superiores as fabricadas com o comprimento de 70,00 mm.

Tabela 12 – NRC das amostras A (configuração 1).

(continua)

Amostra	Experimento	Coeficiente de absorção sonora				NRC
		250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	
A1	1	0,048	0,063	0,084	0,117	0,078
	2	0,049	0,075	0,097	0,132	0,088
	3	0,053	0,066	0,081	0,117	0,079
	Média	0,050	0,068	0,087	0,122	0,082
	Desv. Padrão	0,003	0,006	0,009	0,009	0,006
A2	1	0,040	0,048	0,065	0,105	0,065
	2	0,031	0,043	0,063	0,110	0,062
	3	0,030	0,067	0,086	0,117	0,075
	Média	0,034	0,053	0,071	0,110	0,067
	Desv. Padrão	0,006	0,013	0,013	0,006	0,007
A3	1	0,056	0,079	0,114	0,151	0,100
	2	0,059	0,075	0,106	0,160	0,100
	3	0,058	0,079	0,113	0,186	0,109
	Média	0,058	0,078	0,111	0,166	0,103
	Desv. Padrão	0,001	0,003	0,004	0,018	0,005
A4	1	0,051	0,067	0,106	0,133	0,089
	2	0,047	0,071	0,091	0,153	0,091
	3	0,052	0,034	0,054	0,113	0,063
	Média	0,050	0,057	0,084	0,133	0,081
	Desv. Padrão	0,003	0,021	0,027	0,020	0,016
A5	1	0,067	0,078	0,122	0,161	0,107
	2	0,062	0,085	0,129	0,194	0,117
	3	0,060	0,082	0,114	0,175	0,108
	Média	0,063	0,082	0,121	0,177	0,111
	Desv. Padrão	0,003	0,004	0,007	0,017	0,006
A6	1	0,040	0,071	0,101	0,168	0,095
	2	0,072	0,075	0,117	0,160	0,106
	3	0,045	0,055	0,076	0,128	0,076
	Média	0,053	0,067	0,098	0,152	0,092
	Desv. Padrão	0,017	0,011	0,021	0,021	0,015
A7	1	0,076	0,114	0,180	0,266	0,159
	2	0,071	0,094	0,144	0,260	0,142
	3	0,063	0,089	0,131	0,261	0,136
	Média	0,070	0,099	0,152	0,262	0,146
	Desv. Padrão	0,007	0,014	0,025	0,003	0,012

Tabela 13 – NRC das amostras A (configuração 1).

(conclusão)

Amostra	Experimento	Coeficiente de absorção sonora				NRC
		250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	
A8	1	0,052	0,066	0,091	0,173	0,096
	2	0,049	0,057	0,087	0,201	0,099
	3	0,041	0,050	0,066	0,179	0,084
	Média	0,047	0,058	0,081	0,184	0,093
	Desv. Padrão	0,006	0,008	0,013	0,014	0,008

A Tabela 13 apresenta os NRC calculados a partir dos coeficientes de absorção sonora das amostras B. Os resultados demonstraram que a amostra B1 obteve o melhor desempenho. Além disso, as amostras pares, que tem em comum a espessura da camada de gesso, demonstraram resultados mais baixos e semelhantes.

Por meio da Tabela 13 constata-se que o aumento da espessura das amostras de 7,00 para 10,00 mm não acarretaram em melhoria nos resultados. Pois, as amostras com a espessura menor obtiveram desempenho igual ou superior as fabricadas com a espessura maior.

Tabela 14 – NRC das amostras B (configuração 2).

(continua)

Amostra	Repetição	Coeficiente de absorção sonora				NRC
		250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	
B1	1	0,248	0,446	0,204	0,099	0,249
	2	0,234	0,255	0,161	0,101	0,188
	3	0,205	0,321	0,206	0,106	0,210
	Média	0,229	0,341	0,190	0,102	0,216
	Desvio Padrão	0,022	0,097	0,025	0,004	0,031
B2	1	0,186	0,143	0,113	0,083	0,131
	2	0,185	0,140	0,094	0,096	0,129
	3	0,197	0,148	0,110	0,085	0,135
	Média	0,189	0,144	0,106	0,088	0,132
	Desvio Padrão	0,007	0,004	0,011	0,007	0,003
B3	1	0,143	0,134	0,122	0,107	0,127
	2	0,166	0,231	0,191	0,114	0,176
	3	0,203	0,206	0,162	0,110	0,170
	Média	0,171	0,191	0,158	0,111	0,158
	Desvio Padrão	0,030	0,050	0,034	0,004	0,027
B4	1	0,111	0,102	0,119	0,087	0,105
	2	0,214	0,171	0,102	0,098	0,146
	3	0,163	0,200	0,128	0,084	0,144
	Média	0,163	0,158	0,117	0,090	0,132
	Desvio Padrão	0,052	0,050	0,013	0,007	0,023

Tabela 13 – NRC das amostras B (configuração 2).

(conclusão)

Amostra	Repetição	Coeficiente de absorção sonora				NRC
		250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	
B5	1	0,198	0,211	0,164	0,111	0,171
	2	0,280	0,356	0,182	0,127	0,236
	3	0,147	0,180	0,173	0,106	0,152
	Média	0,208	0,249	0,173	0,114	0,186
	Desvio Padrão	0,067	0,094	0,009	0,011	0,044
B6	1	0,156	0,195	0,162	0,097	0,153
	2	0,151	0,157	0,124	0,090	0,130
	3	0,214	0,169	0,120	0,095	0,150
	Média	0,174	0,174	0,135	0,094	0,144
	Desvio Padrão	0,035	0,019	0,023	0,004	0,012
B7	1	0,368	0,393	0,195	0,157	0,278
	2	0,096	0,098	0,070	0,109	0,093
	3	0,194	0,220	0,130	0,127	0,168
	Média	0,219	0,237	0,131	0,131	0,180
	Desvio Padrão	0,138	0,148	0,063	0,024	0,093
B8	1	0,223	0,209	0,137	0,111	0,170
	2	0,101	0,105	0,087	0,104	0,099
	3	0,201	0,195	0,113	0,115	0,156
	Média	0,175	0,170	0,112	0,110	0,142
	Desvio Padrão	0,065	0,057	0,025	0,006	0,038

A partir dos resultados da Tabela 14, que apresenta os NRC das amostras C, verifica-se que a amostra C8, que possui a espessura de 10,00 mm e 120,00 kg/m³ e as fibras com o comprimento de 70,00 mm, obteve o melhor desempenho. Contudo, a amostra C2, que tem a espessura de 7,00 mm e a densidade de 80,00 kg/m³ e as fibras com o mesmo comprimento da amostra C8, teve o menor NRC.

Comparando-se as amostras C1 e C2, que possuem a mesma espessura e densidade, observa-se que o aumento do comprimento da fibra de 10,00 para 70,00 mm não acarretou em melhoria nos resultados. No entanto, ao comparar as amostras C3 e C4, que também possuem a mesma espessura e densidade, verifica-se que houve aumento no NRC. Além disso, as amostras com a densidade de 120,00 kg/m³ (C5 a C8) demonstraram melhor desempenho de absorção sonora comparando-se com as de 80,00 kg/m³ (C1 a C4).

Tabela 14 - NRC das amostras C (configuração 3).

(continua)

Amostra	Experimento	Coeficiente de absorção sonora				NRC
		250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	
C1	1	0,039	0,049	0,075	0,100	0,066
	2	0,038	0,045	0,063	0,081	0,057
	3	0,039	0,045	0,051	0,075	0,053
	Média	0,039	0,046	0,063	0,085	0,058
	Desv. Padrão	0,001	0,002	0,012	0,013	0,007
C2	1	0,037	0,043	0,054	0,078	0,053
	2	0,032	0,043	0,044	0,079	0,050
	3	0,038	0,045	0,058	0,071	0,053
	Média	0,036	0,044	0,052	0,076	0,052
	Desv. Padrão	0,003	0,001	0,007	0,005	0,002
C3	1	0,035	0,041	0,053	0,076	0,051
	2	0,036	0,045	0,062	0,097	0,060
	3	0,040	0,043	0,050	0,091	0,056
	Média	0,037	0,043	0,055	0,088	0,056
	Desv. Padrão	0,002	0,002	0,006	0,011	0,004
C4	1	0,041	0,050	0,059	0,098	0,062
	2	0,033	0,043	0,059	0,103	0,059
	3	0,045	0,062	0,097	0,156	0,090
	Média	0,039	0,052	0,071	0,119	0,070
	Desv. Padrão	0,006	0,010	0,022	0,032	0,017
C5	1	0,049	0,069	0,102	0,138	0,089
	2	0,042	0,054	0,071	0,158	0,081
	3	0,039	0,055	0,071	0,122	0,072
	Média	0,043	0,059	0,081	0,139	0,081
	Desv. Padrão	0,005	0,008	0,018	0,018	0,009
C6	1	0,038	0,065	0,083	0,149	0,084
	2	0,042	0,062	0,089	0,190	0,096
	3	0,039	0,059	0,090	0,158	0,086
	Média	0,040	0,062	0,087	0,166	0,089
	Desv. Padrão	0,002	0,003	0,004	0,022	0,006
C7	1	0,051	0,078	0,128	0,215	0,118
	2	0,043	0,054	0,068	0,165	0,082
	3	0,046	0,060	0,094	0,175	0,094
	Média	0,047	0,064	0,096	0,185	0,098
	Desv. Padrão	0,004	0,013	0,030	0,026	0,018

Tabela 14 - NRC das amostras C (configuração 3).

(conclusão)

Amostra	Experimento	Coeficiente de absorção sonora				NRC
		250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	
C8	1	0,053	0,076	0,108	0,189	0,106
	2	0,054	0,073	0,125	0,249	0,125
	3	0,048	0,073	0,124	0,255	0,125
	Média	0,051	0,074	0,119	0,231	0,119
	Desv. Padrão	0,003	0,002	0,010	0,037	0,011

Pelos dados apresentados na Tabela 15, que exibe os NRC das amostras D, nota-se que a amostra D8, que possui a densidade de 120,00 kg/m³ e as espessuras das camadas de gesso e a de fibra de 7,50 e 10,00 mm, respectivamente, obteve o melhor desempenho de absorção sonora. A D3 obteve o menor NRC, a amostra possui a densidade de 80,00 kg/m³ e as camadas de gesso e a de fibra com 5,00 e 10,00 mm, respectivamente.

Comparando-se as amostras D1 e D3, que possuem a mesma densidade e espessura da camada de gesso, percebe-se o aumento da espessura da fibra não resultou em melhoria no NRC. Contudo, ao comparar as amostras D2 e D4, que também possuem a mesma densidade e espessura da camada de gesso, observa-se que houve melhoria no NRC.

Tabela 15 - NRC das amostras D (configuração 4).

(continua)

Amostra	Experimento	Coeficiente de absorção sonora				NRC
		250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	
D1	1	0,067	0,102	0,279	0,769	0,304
	2	0,064	0,093	0,245	0,725	0,282
	3	0,067	0,091	0,236	0,641	0,259
	Média	0,066	0,095	0,253	0,712	0,282
	Desvio padrão	0,002	0,006	0,023	0,065	0,023
D2	1	0,069	0,126	0,401	0,746	0,335
	2	0,078	0,110	0,434	0,711	0,333
	3	0,064	0,113	0,411	0,697	0,321
	Média	0,070	0,117	0,415	0,718	0,330
	Desvio padrão	0,007	0,008	0,017	0,025	0,008
D3	1	0,065	0,111	0,290	0,670	0,284
	2	0,070	0,104	0,268	0,652	0,273
	3	0,064	0,105	0,326	0,604	0,275
	Média	0,066	0,107	0,294	0,642	0,277
	Desvio padrão	0,003	0,004	0,029	0,034	0,006

Tabela 15 - NRC das amostras D (configuração 4).

(conclusão)

Amostra	Experimento	Coeficiente de absorção sonora				NRC
		250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	
D4	1	0,101	0,227	0,554	0,568	0,363
	2	0,075	0,156	0,579	0,601	0,353
	3	0,067	0,134	0,557	0,569	0,332
	Média	0,081	0,173	0,563	0,580	0,349
	Desvio padrão	0,018	0,049	0,014	0,019	0,016
D5	1	0,065	0,101	0,232	0,691	0,272
	2	0,073	0,120	0,331	0,767	0,323
	3	0,063	0,115	0,355	0,693	0,306
	Média	0,067	0,112	0,306	0,717	0,300
	Desvio padrão	0,005	0,010	0,065	0,043	0,026
D6	1	0,054	0,136	0,536	0,626	0,338
	2	0,077	0,166	0,592	0,618	0,363
	3	0,066	0,124	0,507	0,624	0,330
	Média	0,066	0,142	0,545	0,623	0,344
	Desvio padrão	0,012	0,022	0,043	0,004	0,017
D7	1	0,073	0,122	0,379	0,666	0,310
	2	0,080	0,133	0,381	0,701	0,324
	3	0,078	0,133	0,396	0,689	0,324
	Média	0,077	0,129	0,385	0,685	0,319
	Desvio padrão	0,003	0,007	0,009	0,018	0,008
D8	1	0,078	0,175	0,631	0,603	0,372
	2	0,072	0,120	0,521	0,618	0,333
	3	0,074	0,160	0,618	0,641	0,373
	Média	0,075	0,151	0,590	0,621	0,359
	Desvio padrão	0,003	0,029	0,060	0,019	0,023

A Figura 82 apresenta uma comparação entre os NRC das amostras A, B, C e D. Por meio da análise da figura percebe-se que as amostras D, formadas pelo painel sanduiche com uma camada com perfurações, apresentou o melhor desempenho de absorção sonora. Dentre as amostras D, como verificado na Tabela 15, a D8 exibiu o melhor NRC.

Comparando-se as amostras A e C de mesmo número, observa-se que somente a C8, amostra fabricada com fibra e cola, obteve melhor desempenho do que as amostras A, confeccionadas com a fibra sem ligante.

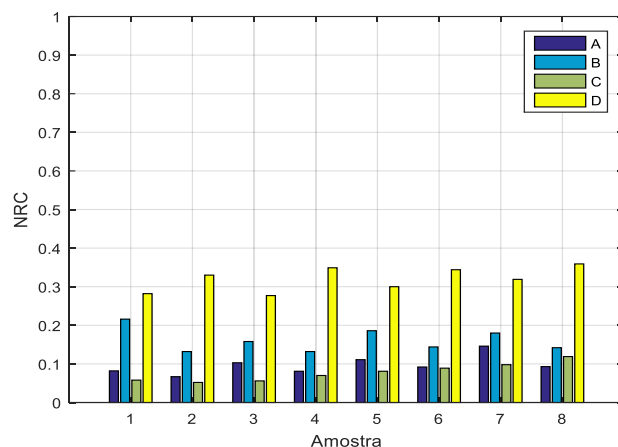


Figura 82 - Comparação entre os NRC das amostras confeccionadas.

Das amostras de fibra desenvolvidas neste estudo a A7, que possui a espessura e o comprimento da fibra de 10,00 mm e densidade de 120,00 kg/m³ e sem a adição de ligantes, apresentou o melhor NRC.

A Tabela 16 apresenta uma comparação entre os resultados das amostras A7 e distintos materiais citados na revisão bibliográfica. Para a comparação o valor do NRC da amostra A7 foi arredondado em um valor múltiplo de 0,05, seguindo a metodologia de Barron (2001).

Por meio dos dados da Tabela 16 observa-se que a amostra fabricada com a fibra extraída do pseudocaule da bananeira não apresentou bom potencial de absorção sonora nas bandas de frequência de 250 a 2000 Hz, visto que, dentre os materiais comparados, foi a que obteve menor NRC.

Tabela 16 - Comparação entre a amostra A7 e diferentes materiais naturais.

	Espessura (m)	Densidade (kg/m ³)	NRC
Amostra A7	0,0100	120	0,150
Juta (FATIMA, 2011)	0,0254	200	0,600
Fibra de Yucca (SOLTANI et a., 2020)	0,0150	200	0,180
Papel reciclado (RICCIARDI et a., 2014)	0,0120	433	0,250
Fibra de coco (BERARDI e IANNACE , 2015)	0,0500	60	0,500
Fibra de cana (BERARDI e IANNACE , 2015)	0,0400	400	0,250
Cortiça (BERARDI e IANNACE , 2015)	0,0300	100	0,300

5.1.3 Planejamento fatorial completo

O planejamento fatorial completo para cada amostra foi desenvolvido a partir do valor de NRC da mesma. A Tabela 17 apresenta a matriz de planejamento das amostras A com os NRC das 3 réplicas fabricas para cada tipo de amostra e a média aritmética entre os NRC.

Tabela 17 - Matriz de planejamento das amostras A com os NRC.

Amostra	Comprimento das fibras (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)	NRC			Média
A1	10,00	7,00	80,00	0,0780	0,0880	0,0790	0,0820
A2	70,00	7,00	80,00	0,0650	0,0620	0,0750	0,0670
A3	10,00	10,00	80,00	0,1000	0,1000	0,1090	0,1030
A4	70,00	10,00	80,00	0,0890	0,0910	0,0630	0,0810
A5	10,00	7,00	120,00	0,1070	0,1170	0,1080	0,1110
A6	70,00	7,00	120,00	0,0950	0,1060	0,0760	0,0920
A7	10,00	10,00	120,00	0,1590	0,1420	0,1360	0,1460
A8	70,00	10,00	120,00	0,0960	0,0990	0,0840	0,0930

A partir dos NRC de cada amostra desenvolvida, operando-se o *software* Minitab, calculou-se a interação entre os fatores adotados para a construção de cada amostra. A Tabela 18 apresenta o efeito de interação entre fatores adotados para nas amostras A. Por meio da tabela percebe-se que a adoção dos diferentes níveis para o fator principal comprimento da fibra, e a interação entre dois fatores: comprimento da fibra x espessura da amostra e Comprimento das fibras x Densidade da amostra e a interação entre três fatores: Comprimento das fibras x Espessura da amostra x Densidade da amostra, não resultou em melhoria no NRC.

Tabela 18 – Interação entre fatores das amostras A e seus respectivos erros padrão (%).

Fator	Valor
Média	0,0968 ± 0,0020
Comprimento das fibras	0,0272 ± 0,0040
Espessura da amostra	0,0177 ± 0,0040
Densidade da amostra	0,0272 ± 0,0040
Comprimento das fibras x Espessura da amostra	-0,0105 ± 0,0040
Comprimento das fibras x Densidade da amostra	-0,0087 ± 0,0040
Espessura da amostra x Densidade da amostra	0,0002 ± 0,0040
Comprimento das fibras x Espessura da amostra x Densidade da amostra	-0,0067 ± 0,0040

Por meio da Tabela 18 percebe-se que ao subtrair o valor de interação entre espessura da amostra e densidade da amostra pelo erro padrão têm-se um valor abaixo de 0, o que torna esta interação insignificante. Para a verificação da significância dos fatores principais e das interações o erro padrão das amostras A (0,004) foi multiplicado pelo valor de T_8 (para 8 graus de liberdade) para 95% de confiança (2,306), resultando em 0,0100, esse é o valor mínimo para que as amostras sejam consideradas significantes.

A Tabela 19 apresenta a comparação entre os efeitos e o valor mínimo para significância. Por meio da análise da tabela observa-se que todos os fatores principais e a interação entre comprimento da fibra e espessura da amostra demonstra significância nos resultados.

Tabela 19 - Valores dos efeitos principais e interações das amostras A.

Fator	Valor
Média	0,0968 > 0,0100
Comprimento das fibras	0,0272 > 0,0100
Espessura da amostra	0,0177 > 0,0100
Densidade da amostra	0,0272 > 0,0100
Comprimento das fibras x Espessura da amostra	0,0105 > 0,0100
Comprimento das fibras x Densidade da amostra	-0,0087 < 0,0100
Espessura da amostra x Densidade da amostra	0,0002 < 0,0100
Comprimento das fibras x Espessura da amostra x Densidade da amostra	-0,0067 < 0,0100

De forma análoga ao que foi realizado com as amostras A, a partir dos valores de NRC das amostras B desenvolveu-se a matriz de planejamento, apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 - Matriz de planejamento das amostras B com os NRC.

Amostra	Espessura da camada de gesso (mm)	Espessura da camada de fibra (mm)	Densidade da camada de fibra (kg/m³)	NRC			Média
B1	5,00	7,00	80,00	0,2490	0,1880	0,2100	0,2160
B2	7,50	7,00	80,00	0,1310	0,1290	0,1350	0,1320
B3	5,00	10,00	80,00	0,1270	0,1760	0,1700	0,1580
B4	7,50	10,00	80,00	0,1050	0,1460	0,1440	0,1320
B5	5,00	7,00	120,00	0,1710	0,2360	0,1520	0,1860
B6	7,50	7,00	120,00	0,1530	0,1300	0,1500	0,1440
B7	5,00	10,00	120,00	0,2780	0,0930	0,1680	0,1800
B8	7,50	10,00	120,00	0,1700	0,0990	0,1560	0,1420

De posse dos valores de NRC das amostras B, calculou-se os efeitos principais e de interação entre 2 e 3 fatores, demonstrados na Tabela 21. Por meio dos resultados verifica-se que, ao subtrair os efeitos pelo erro padrão, só não se obtém resultados abaixo de 0 no efeito principal: espessura da camada de gesso, o que indica que tal efeito é o único significativo.

Tabela 21 - Interação entre fatores das amostras B e seus respectivos erros padrão (%).

Fator	Valor
Média	0,1611 ± 0,0085
Espessura da camada de gesso	-0,0475 ± 0,0170
Espessura da camada de fibra	-0,0168 ± 0,0170
Densidade da camada de fibra	0,0038 ± 0,0170
Espessura da camada de gesso x Espessura da camada de fibra	0,0155 ± 0,0170
Espessura da camada de gesso x Densidade da camada de fibra	0,0075 ± 0,0170
Espessura da camada de fibra x Densidade da camada de fibra	0,0125 ± 0,0170
Espessura da camada de gesso x Espessura da camada de fibra x Densidade da camada de fibra	-0,0135 ± 0,0170

Para a comprovação da significância dos efeitos, assim como foi realizado para as amostras A, calculou-se o valor mínimo para a significância, obtendo como resultado 0,0390. Por meio dos resultados exibidos na Tabela 22 constata-se que, além da média, a espessura da

camada de gesso é o único efeito que demonstrou resultados acima do valor mínimo, levando a certificação da significância de tal resultado.

Tabela 22 - Valores dos efeitos principais e interações das amostras B.

Fator	Valor
Média	0,1611 > 0,0390
Espessura da camada de gesso	0,0475 > 0,0390
Espessura da camada de fibra	0,0168 < 0,0390
Densidade da camada de fibra	0,0038 < 0,0390
Espessura da camada de gesso x Espessura da camada de fibra	0,0155 < 0,0390
Espessura da camada de gesso x Densidade da camada de fibra	0,0075 < 0,0390
Espessura da camada de fibra x Densidade da camada de fibra	0,0125 < 0,0390
Espessura da camada de gesso x Espessura da camada de fibra x Densidade da camada de fibra	-0,0135 < 0,0390

A matriz de planejamento das amostras C, com seus respectivos NRC, é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 - Matriz de planejamento das amostras C com os NRC.

Amostra	Comprimento das fibras (mm)	Espessura (mm)	Densidade (kg/m³)	NRC			Média
C1	10,00	7,00	80,00	0,0660	0,0570	0,0530	0,0580
C2	70,00	7,00	80,00	0,0530	0,0500	0,0530	0,0520
C3	10,00	10,00	80,00	0,0510	0,0600	0,0560	0,0560
C4	70,00	10,00	80,00	0,0620	0,0590	0,0900	0,0700
C5	10,00	7,00	120,00	0,0890	0,0810	0,0720	0,0810
C6	70,00	7,00	120,00	0,0840	0,0960	0,0860	0,0890
C7	10,00	10,00	120,00	0,1180	0,0820	0,0940	0,0980
C8	70,00	10,00	120,00	0,1060	0,1250	0,1250	0,1190

A partir dos dados de NRC apresentados na Tabela 23, calculou-se a interação entre os fatores, bem como seus respectivos erros padrão, apresentados na Tabela 24. Por meio dos resultados apresentados na tabela observa-se que a interação entre dois fatores: Comprimento das fibras x Densidade da amostra e a interação entre três fatores resultou em valores abaixo de 0 ao se subtrair o erro padrão. Portanto, tais fatores demonstram-se insignificantes.

Tabela 24 - Interação entre fatores das amostras C e seus respectivos erros padrão (%).

Fator	Valor
Média	0,0778 ± 0,0028
Comprimento das fibras	0,0092 ± 0,0056
Espessura da amostra	0,0157 ± 0,0056
Densidade da amostra	0,0373 ± 0,0056
Comprimento das fibras x Espessura da amostra	0,0085 ± 0,0056
Comprimento das fibras x Densidade da amostra	0,0052 ± 0,0056
Espessura da amostra x Densidade da amostra	0,0080 ± 0,0056
Comprimento das fibras x Espessura da amostra x Densidade da amostra	-0,0021 ± 0,0056

Para a constatação da significância dos demais fatores apresentados na Tabela 24, calculou-se o valor mínimo de significância, resultando em 0,0130. Tal valor foi comparado com os valores de interação, exibidos na Tabela 25. Por meio dos resultados verifica-se que os efeitos principais: Espessura da amostra e Densidade da amostra foram os únicos a demonstrar significância.

Tabela 25 - Valores dos efeitos principais e interações das amostras C.

Fator	Valor
Média	0,0778 > 0,0130
Comprimento da fibra	0,0092 < 0,0130
Espessura da amostra	0,0157 > 0,0130
Densidade da amostra	0,0373 > 0,0130
Comprimento da fibra x Espessura da amostra	0,0085 < 0,0130
Comprimento da fibra x Densidade da amostra	0,0052 < 0,0130
Espessura da amostra x Densidade da amostra	0,0080 < 0,0130
Comprimento da fibra x Espessura da amostra x Densidade da amostra	-0,0021 < 0,0130

A Tabela 26 apresenta os resultados dos NRC das amostras D empregados no cálculo da interação.

Tabela 26 - Matriz de planejamento das amostras D com os NRC.

Amostra	Espessura da camada de gesso (mm)	Espessura da camada de fibra (mm)	Densidade da camada de fibra (kg/m³)	NRC			Média
D1	5,00	7,00	80,00	0,3040	0,2820	0,2590	0,2820
D2	7,50	7,00	80,00	0,3350	0,3330	0,3210	0,3300
D3	5,00	10,00	80,00	0,2840	0,2730	0,2750	0,2770
D4	7,50	10,00	80,00	0,3630	0,3530	0,3320	0,3490
D5	5,00	7,00	120,00	0,2720	0,3230	0,3060	0,3000
D6	7,50	7,00	120,00	0,3380	0,3630	0,3300	0,3440
D7	5,00	10,00	120,00	0,3100	0,3240	0,3240	0,3190
D8	7,50	10,00	120,00	0,3720	0,3330	0,3730	0,3590

Os resultados das interações entre fatores das amostras D é apresentado na Tabela 27. Subtraindo-se o erro padrão dos valores de interação, é possível perceber que as interações de dois níveis: Espessura da camada de gesso x Espessura da camada de fibra e Espessura da camada de fibra x Densidade da camada de fibra, bem como a interação entre três fatores, apresentou resultados abaixo de 0, demonstrando insignificância.

Tabela 27 - Interação entre fatores das amostras D e seus respectivos erros padrão (%).

Fator	Valor
Média	0,3200 ± 0,0037
Espessura da camada de gesso	0,0508 ± 0,0075
Espessura da camada de fibra	0,0125 ± 0,0075
Densidade da camada de fibra	0,0212 ± 0,0075
Espessura da camada de gesso x Espessura da camada de fibra	0,0052 ± 0,0075
Espessura da camada de gesso x Densidade da camada de fibra	-0,0092 ± 0,0075
Espessura da camada de fibra x Densidade da camada de fibra	0,0048 ± 0,0075
Espessura da camada de gesso x Espessura da camada de fibra x Densidade da camada de fibra	-0,0068 ± 0,0075

Como realizou-se para as demais amostras, para a conclusão de que os fatores são ou não significantes, comparou-se os valores de interação com o valor mínimo de significância, sendo tal valor, para as amostras D, igual a 0,0173. A Tabela 28 apresenta a comparação.

Por meio da análise dos dados da Tabela 28 observa-se que, além da média, os fatores principais espessura da camada de gesso e densidade da camada de fibra fornece resultados

acima do mínimo. Portanto, foram os únicos fatores onde a modificação dos níveis apresentou resultados significantes.

Tabela 28 - Valores dos efeitos principais e interações das amostras D.

Fator	Valor
Média	0,3200 > 0,0173
Espessura da camada de gesso	0,0508 > 0,0173
Espessura da camada de fibra	0,0125 < 0,0173
Densidade da camada de fibra	0,0212 > 0,0173
Espessura da camada de gesso x Espessura da camada de fibra	0,0052 < 0,0173
Espessura da camada de gesso x Densidade da camada de fibra	-0,0092 < 0,0173
Espessura da camada de fibra x Densidade da camada de fibra	0,0048 < 0,0173
Espessura da camada de gesso x Espessura da camada de fibra x Densidade da camada de fibra	-0,0068 < 0,0173

5.1.3 Perda de Transmissão sonora

Para as amostras B e D, que possuem a estrutura de um painel sanduíche, também foi verificado a perda de transmissão sonora. As Figuras 83 e 85 apresentam os resultados obtidos com cada amostra ensaiada.

Avaliando a Figura 83 percebe-se que nas bandas de frequência de 100 a 1250 Hz a amostra B8, que possui a densidade de 120,00 kg/m³ e a espessura da camada de gesso e fibra de 7,50 e 10,00 mm, respectivamente, apresentou o melhor potencial de isolamento sonoro. Nessa mesma faixa de frequência nota-se que as amostras pares, que tem em comum a espessura da camada de gesso de 7,50 mm, demonstraram resultados superiores as amostras ímpares, que possuem a espessura da camada de gesso de 5,00 mm.

Nas bandas de frequências de 125 a 1250 Hz observa-se uma semelhança entre os resultados das amostras B2 e B7, ambas as amostras possuem as espessuras e densidades distintas: a amostra B2 possui a densidade de 80,00 kg/m³ e as espessuras das camadas de gesso e fibra com 7,50 e 7,00 mm, respectivamente, e a B7 com 120,00 kg/m³ e as espessuras das camadas de gesso e fibra de 5,00 e 10,00 mm, respectivamente.

Observa-se que todas as amostras demonstraram desempenho semelhante nas frequências acima de 2000 Hz. No entanto, na frequência citada, nota-se que as amostras com

a densidade de 80,00 kg/m³ (B1 a B4) exibiu isolamento superior as amostras de 120,00 kg/m³ (B5 a B8).

Conforme os resultados de perda de transmissão das amostras B verifica-se que até 1250 Hz as amostras com a camada de gesso de 10 mm demonstraram resultados superiores as de 7,50 mm. Tal informação confirma a tese de que o aumento da espessura de um material aumenta o seu isolamento sonoro, embora o aumento da espessura da amostra não foi dobrado (100%), conforme a teoria da lei das massas, o aumento de 50% na espessura demonstrou isolamento foi significativo.

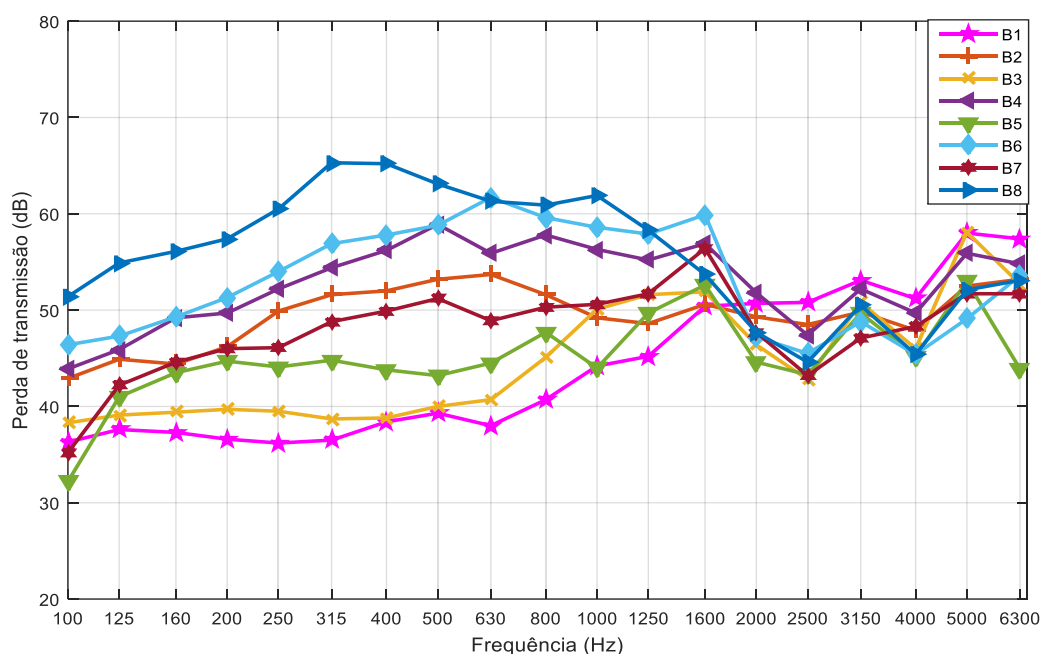


Figura 83 - Perda de transmissão sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras B (configuração 2).

Os resultados da análise estatística das amostras B, disponível no Apêndice C, indica que a amostra B8, até a banda de 4000 Hz, demonstra a maior significância. Nas bandas de 5000 e 6300 Hz a amostra B1 é a mais significante. Tais resultados confirmam que a amostra B8, até 1250 Hz e a amostra B1, nas bandas de 5000 a 6300 Hz, são as que possuem maior potencial acústico.

A Figura 84 apresenta uma comparação entre dois painéis sanduíches confeccionados com gesso e com o interior sem preenchimento e duas das amostras B que demonstraram os melhores desempenhos de TL em distintas bandas de frequências, B7 e B8. Pela amostra B7

possuir as camadas de gesso com 5,00 mm de espessura, comparou-se os seus resultados com os do painel de 5,00 mm, e pelo mesmo motivo a amostra B8 foi comparada com o painel de 7,50 mm.

Por meio dos resultados verifica-se que as amostras B7 e B8, em quase todas as bandas de frequências, obteve desempenho superior ao painel sanduíche sem preenchimento. Observa-se que somente nas bandas de frequências de 100 a 125 Hz a amostra B7 indicou resultados inferior ao painel sem preenchimento. Comparando-se a amostra B7 com o painel de 5,00 mm e a amostra B8 com o painel de 7,50 mm percebe-se que ambas as amostras melhoraram, em 1600 e 1250 Hz, respectivamente, a TL em 18 dB.

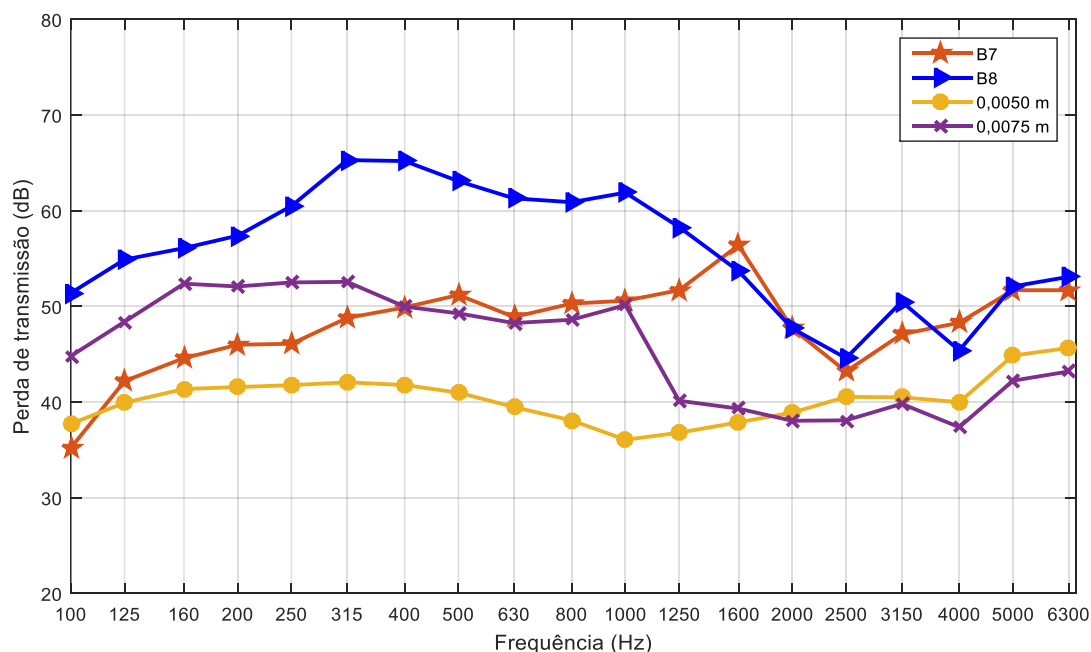


Figura 84 - Comparação entre as amostras B7 e B8 e dois painéis de gesso com diferentes espessuras e com o interior sem preenchimento.

A Figura 85 apresenta os resultados de TL das amostras D. Analisando os resultados verifica-se que todas as amostras obtiveram desempenho semelhante, entretanto, a amostra D8 exibiu resultados superiores as demais em todas as bandas de frequências, seguida pela amostra D6. Ambas as amostras possuem a mesma espessura da camada de gesso (7,50 mm) e densidade ($120,00 \text{ kg/m}^3$).

Pelos resultados da figura percebe-se que as amostras D1 e D3 obtiveram os resultados inferiores, ambas as amostras possuem a espessura da camada de gesso com 5,00 mm e densidade de $80,00 \text{ kg/m}^3$.

De acordo com os resultados das amostras D verifica-se que as amostras de maior espessura da camada de gesso e densidade da camada de fibra obtiveram maior isolamento sonoro. No entanto, nota-se que as amostras constituída pela menor espessura da camada de gesso e com a camada de fibra de maior densidade obtiveram resultados superiores as formadas pela camada de gesso com maior espessura e a camada de fibra de menor densidade, tal análise constata que, além da camada de gesso de maior espessura, a camada de fibra de maior espessura acarreta em melhoria nos resultados.

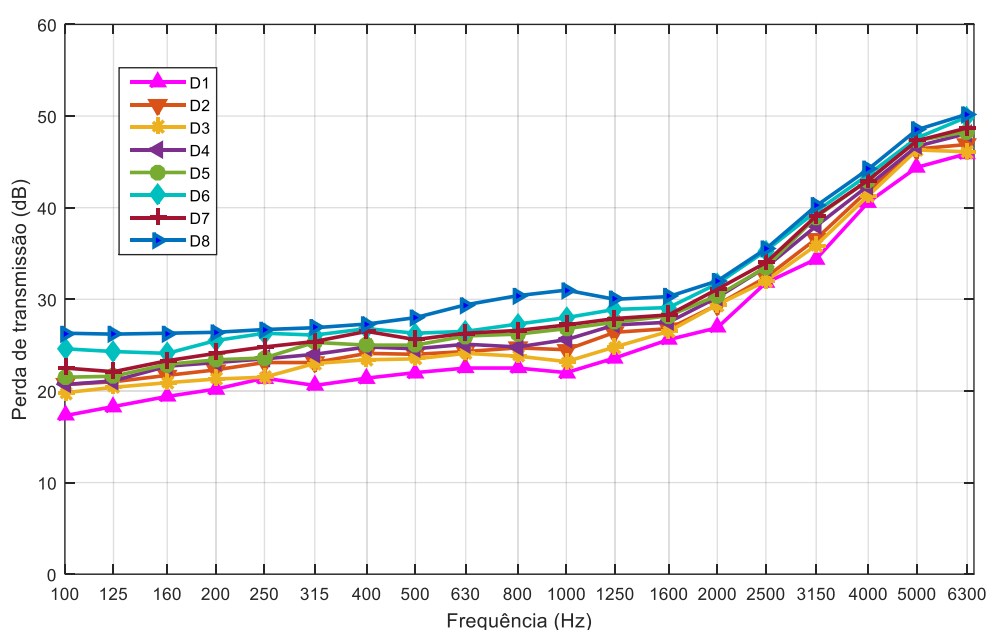


Figura 85 - Perda de transmissão sonora nas bandas de um terço de oitava das amostras D (configuração 4).

De acordo com os resultados da análise estatística da configuração 4, disponível no Apêndice C, observa-se que somente em 400, 800 e 1000 Hz houve distinção entre médias das amostras. Nas frequências citadas observa-se que a amostra D8 obteve a maior significância e a D1 a menor.

Por intermédio dos resultados da perda de transmissão e da análise estatística das amostras D verifica-se que a amostra D8 é a que possui melhor potencial de isolamento sonoro.

Para a verificação se a camada de fibra inserida no interior do painel modificou os resultados, comparou-se as TL das amostras D7 e D8 com painéis de gesso de 5,00 e 7,50 mm de espessura com o interior sem preenchimento. Mediante a análise da Figura 86 percebe-se que, análogo ao demonstrado na Figura 84, as amostras confeccionadas neste estudo melhoraram a TL do painel sanduíche.

Pela figura observa-se que a amostra D7, confeccionada com a camada de gesso possuindo 5,00 mm de espessura, exibiu, em todas bandas de frequências, resultados superiores ao painel sem preenchimento, tendo a amostra D7 obtido cerca de 16 dB em 4000 Hz de diferença na TL. O painel de 7,50 mm demonstrou resultado superior a amostra D8, que possui a camada de gesso com 7,50 mm de espessura, somente em 6300 Hz, nas demais frequências a amostra D8 obteve melhor isolamento sonoro, tendo como diferença máxima 8 dB em 3150 Hz.

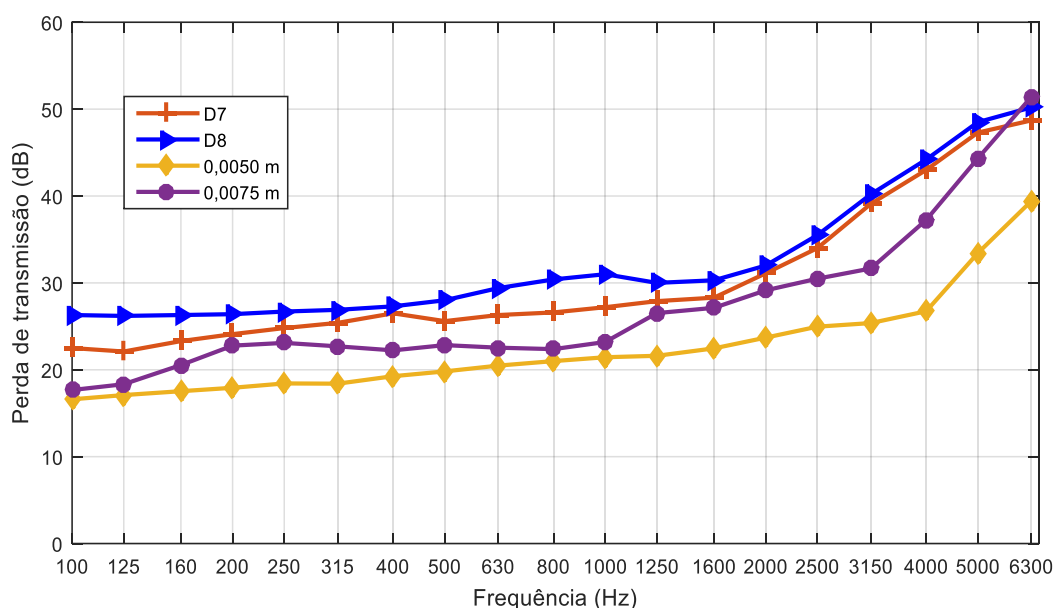


Figura 86 - Comparação entre as amostras D7 e D8 e dois painéis de gesso com diferentes espessuras e com o interior sem preenchimento.

5.2 METODOLOGIA NUMÉRICA

A metodologia numérica consistiu na validação de um modelo numérico de um tubo de impedância desenvolvido no *software* ANSYS® *Workbench*. Para a validação posicionou-se em uma das extremidades do tubo, a impedância de uma amostra desenvolvida no procedimento experimental.

Com o intuito de garantir que os resultados gerados nas simulações fossem confiáveis, para a determinação do tamanho de cada elemento que constitui a malha, realizou-se a convergência de malha para os dois tubos simulados.

Para o tubo de 60 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento discretizou-se o tubo de 20 a 207250 elementos. A Figura 87 apresenta os resultados de pressão sonora em Pa pelos respectivos números de elementos.

Por meio da Figura 87 observa-se que a pressão sonora começa a se estabilizar quando o tubo é discretizado em aproximadamente 3500 elementos. Com o tubo dividido nesta quantidade de elementos, cada elemento possui 0,008 m.

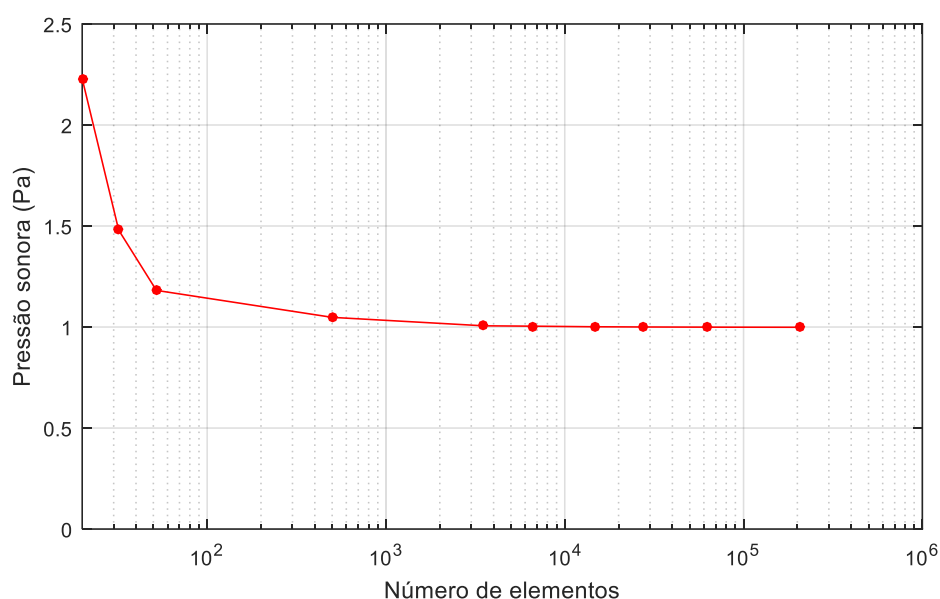


Figura 87 – Análise de convergência de malha do tubo de 60 mm de diâmetro.

O tubo de 30 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento, inicialmente, foi discretizado com 800 elementos, tendo cada elemento 0,01 m. Variou-se a quantidade dos elementos até 634000, possuindo cada elemento 0,0008 m.

A Figura 88 apresenta a análise de convergência de malha aplicada no tubo de 30 mm de diâmetro. Por meio da figura observa-se que a malha convergiu, ou seja, apresentou resultados confiáveis, com aproximadamente 40000 elementos. Com o tubo discretizado na quantidade de elementos citada, cada elemento possui 0,002 m.

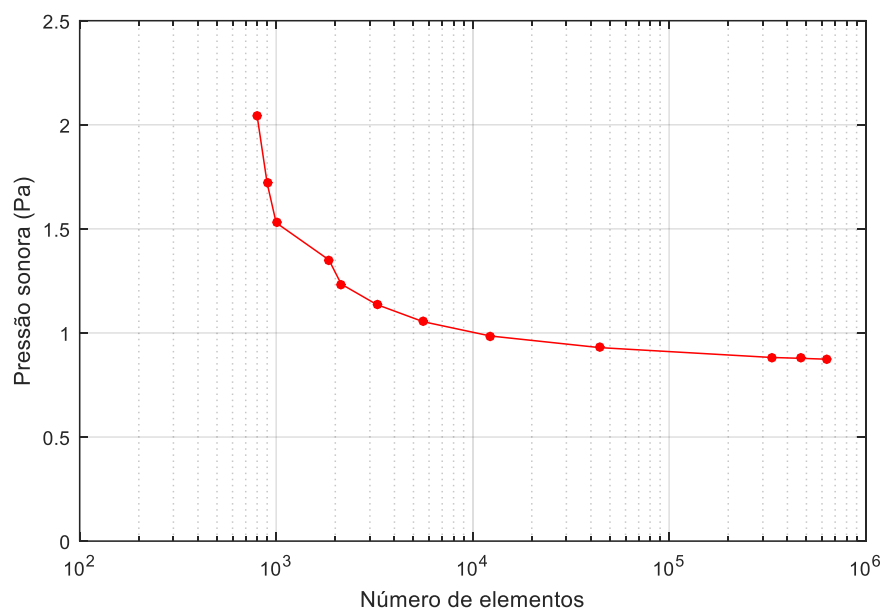


Figura 88 - Análise de convergência de malha do tubo de 30 mm de diâmetro.

Os resultados da quantidade e dos tamanhos dos elementos e as suas respectivas pressões sonoras, bem como o tempo gasto em cada simulação, foi disponibilizado no Apêndice B.

Após a análise da convergência de malha observou-se que o tamanho dos elementos de 0,002 m, determinado por meio da Eq. (22), fornece resultados válidos, portanto, esse foi o tamanho adotado nas simulações.

Como forma de validar os resultados numéricos, os mesmos foram comparados com alguns dos resultados experimentais, conforme demonstrado nas Figuras 89 e 90. Para a validação utilizou-se as amostras A1 e B8, a escolha das amostras ocorreu de forma aleatória.

Por meio da análise da figura observa-se que os resultados experimentais e numéricos apresentaram valores similares. O maior erro absoluto e o relativo entre os resultados experimentais e numéricos, foi de, respectivamente, 0,013 e aproximadamente 8% na amostra A1, 0,016 e 16% na B8.

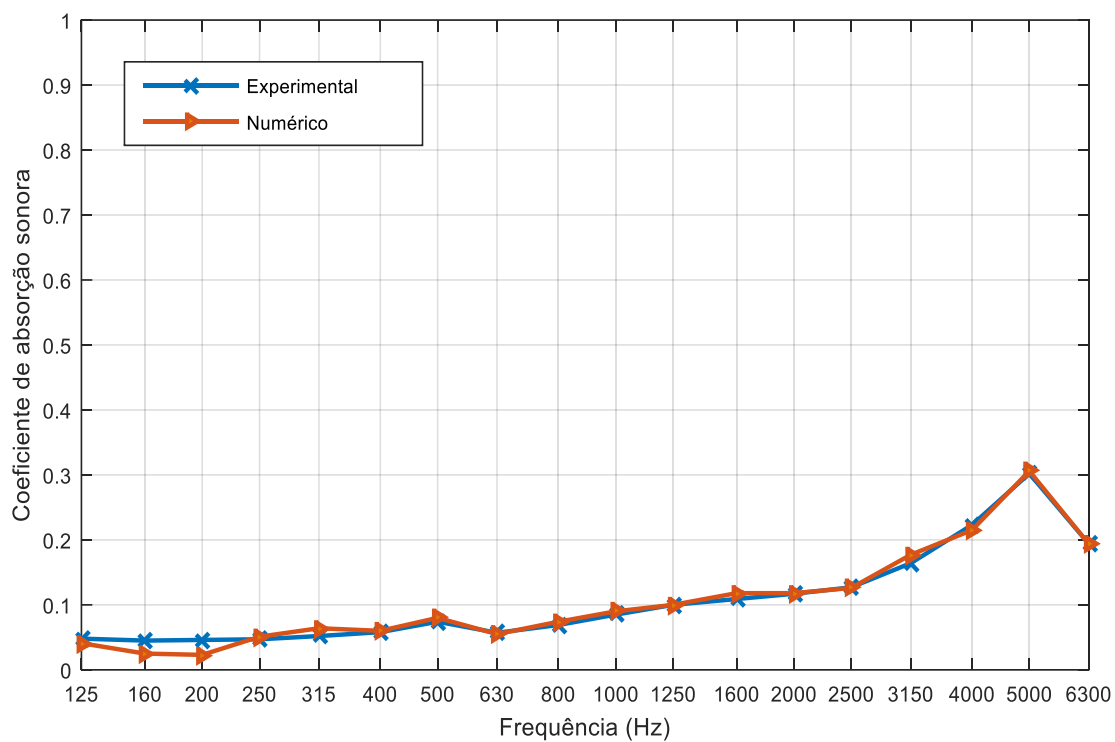


Figura 89 - Coeficientes de absorção sonora na banda de um terço de oitava da amostra A1 obtidos por meio da metodologia experimental e numérica.

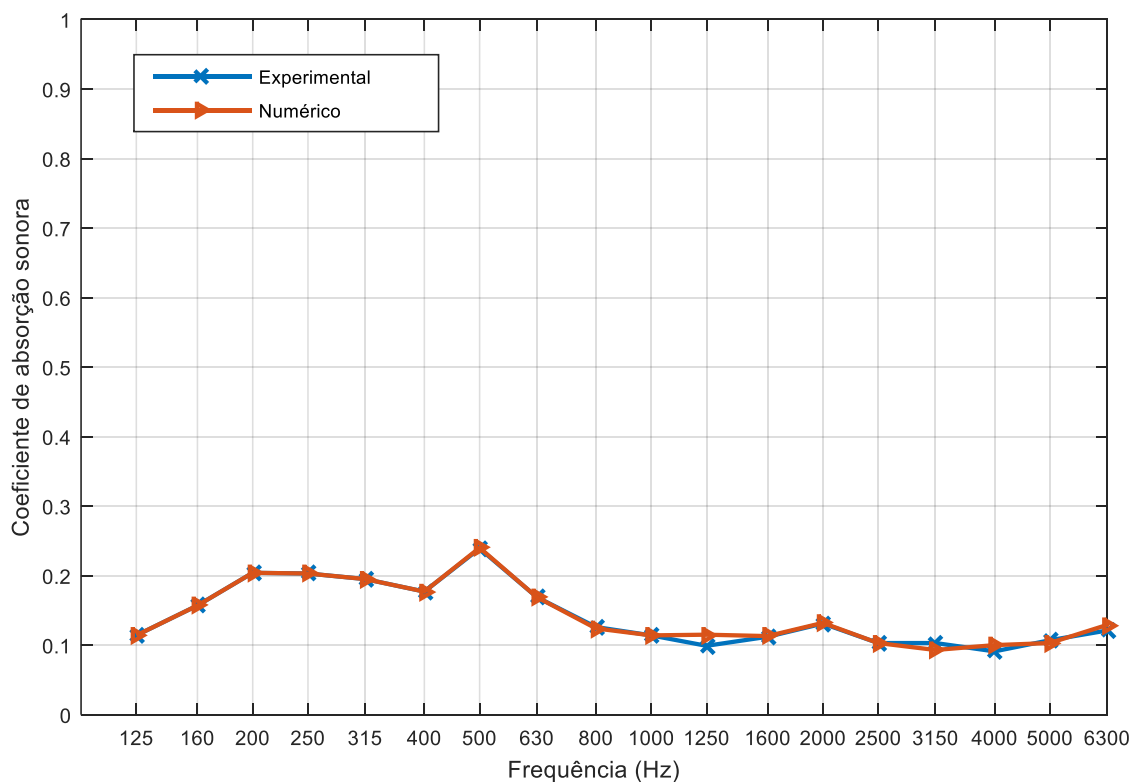


Figura 90 - Coeficientes de absorção sonora na banda de um terço de oitava da amostra B8 obtidos por meio da metodologia experimental e numérica.

Neste estudo foram verificados os coeficientes de absorção sonora e os NRC de amostras constituídas unicamente pela fibra extraída do pseudocaule da bananeira e de amostras confeccionadas com a fibra e adição de uma cola natural. Foram determinados os coeficientes de absorção sonora, os NRC e a perda de transmissão sonora de amostras desenvolvidas no formato de painel sanduíche.

Os coeficientes de absorção sonora e os NRC das amostras A, fabricadas somente com a fibra de bananeira, demonstraram baixo desempenho de absorção sonora até a frequência de 1600 Hz. A amostra A7 apresentou o melhor desempenho de absorção sonora, obtendo o coeficiente de absorção sonora máximo de 0,9 em 6300 Hz e o NRC de 0,146.

Por meio dos resultados das amostras B, configuração 2, percebe-se que as amostras apresentaram baixo desempenho de absorção sonora. Os melhores coeficientes variaram de 0,15 a 0,38 e foi obtido na faixa de frequência de 250 a 1250 Hz com a amostra B1.

Mediante a análise dos resultados de absorção sonora das amostras C conclui-se que a inserção da cola natural não gerou um material com melhoria na absorção sonora. Tal afirmação pôde ser constatada na comparação dos NRCs das amostras A e C, onde sete das amostras A demonstraram desempenho superiores as C.

As amostras D fabricadas com as camadas de gesso contendo a mesma espessura demonstraram coeficientes similares. Avaliando os resultados dos NRC das amostras citadas verifica-se que a amostra D8 indicou o melhor resultado, igual a 0,359. Além disso, por meio da comparação entre os NRC das amostras A, B, C e D observa-se que os resultados das amostras D foram superiores as demais.

Com os valores de perda de transmissão obtidos com as amostras B e D conclui-se que, em ambas as configurações, aquelas constituídas pela camada de gesso com 7,50 mm demonstraram resultados superiores as amostras fabricadas com a camada de gesso de 5,00 mm.

Após a comparação entre as amostras com e sem o preenchimento da fibra, observa-se que a inserção da fibra no interior do painel melhorou o isolamento sonoro do material.

O modelo numérico do tubo de impedância desenvolvido na metodologia experimental foi validado e demonstrou resultados confiáveis, visto que os coeficientes de absorção sonora

da metodologia experimental e numérica tiveram resultados similares, tendo como diferença máxima entre os coeficientes 0,023 na amostra A1.

Com a conclusão deste estudo verificou-se que das amostras fabricadas, a D8 apresentou potencial para aplicação de absorção sonora e perda de transmissão sonora. E das amostras fabricadas somente com a fibra, a amostra A7 obteve os maiores coeficientes de absorção sonora. Além disso, as amostras de fibra, quando aplicadas no interior de painéis pré-moldados, contribuem com a elevação da perda de transmissão sonora.

ABDULHAH, Y.; PUTRA, A. EFFENDY, H. FARID, W. M. AYOB, M. R. **Dried Paddy Straw Fibers as an Acoustic Absorber: A Preliminary Study**. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E354:2019**. “Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room”. 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1050:2019**. “Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System”. 2019.

ATHAYDE, C. S. **Análise dos resíduos gerados pela bananicultura como possível fonte de geração de energia**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

AZEVEDO, L. J.; NABUCO, M. **Sound Absorption of Sisal Fiber Panels**. Inter-noise 2005. The 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Rio de Janeiro, 2005.

BALLAGH, K. O. **Acoustical Properties of Wool**. Applied Acoustics, Vol. 48, No. 2, pp. 101-120, 1996.

BARRON, R. F. **Industrial Noise Control and Acoustics**. Marcel Dekker, Inc. New York, 2001.

BELAKROUM, R.; GHERFI, A.; BOUCHEMA, K.; GHARBI, A.; KERBOUA, Y.; KADJA, M.; MAALOUF, M.; MAI, T. H.; EL WAKIL, N.; LACHI, M. **Hygic Buffler and Acoustic Absorption of New Building Insulation Materials Based on Date Palm Fibers**. Journal of Building Engineering. Vol. 12, pp. 132–139, 2017.

BERARDI, U.; IANNACE, G. **Acoustic Characterization of Natural Fibers for Sound Absorption Applications**. Building and Environment, Vol. 94, pp. 840-852, 2015.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

BÓDEN, H.; ABOM, M. **Influence of Erros on the Two-Microphone Method for Measuring Acoustic Properties in Ducts**. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 79, No. 2, pp. 541–549, 1986.

BHATNAGAR, R.; GUPTA, G.; YADAV, S. **A Review on Composition and Properties of Banana Fibers**. International Journal of Scientific & Engineering Research. Vol. 6, pp. 49-52, Mai. 2015.

CARVALHO, R. P. **Acústica Arquitetônica**. 2. ed. Brasília: Thesaurus, 2010.

CHEN, K.; KANG, J.; **Acoustic Confort in Large Dining Spaces**. Applied Acoustics. Vol. 115, p.166-172. Jan. 2017.

COELHO, R. R. P.; MATA, M. E. R. M. C.; BRAGA, M. E. D. **Alterações dos componentes nutricionais do pseudocaule da bananeira quando processado visando sua transformação em palmito**. Rev. Bras. Prod. Agroind., Vol. 3, n. 1, pp. 21-30. Campina Grande, 2011.

COQUIM, **Produtos Coquim: Placa Acústica**. Disponível em: <http://www.coquim.com.br/conteudo.php?area=produtos&id=27>. Acesso em: 17 jul. 2019.

CROCE, B. **Materiais Acústicos: O Mercado e o Desempenho Acústico**. Disponível em: <http://portalacustica.info/materiais-acusticos-o-mercado-e-o-desempenho-acustico/>. Acesso em: 23 jan. 2019.

CUNHA, P. W. S. **Estudo sobre as Potencialidades de Compósitos à base de Gesso e Fibras de Coco Seco para Aplicação na Construção Civil**. 120 f. Tese de Doutorado em Ciências Exatas e da Terra – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

D’ALESSANDRO, F.; PISPOLA, G. **Sound Absorption Properties of Sustainable Fibrous Materials in an Enhanced Reverberation Room**. Inter-noise 2005. The 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Rio de Janeiro, 2005.

DELANY, M. E.; BAZLEY, E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*. Vol. 3, pp. 105-116, 1969.

DEMARCHI, C. A. **Aplicabilidade de placas de fibra de bananeira: caracterização, produção e absorção sonora**. 2010. 106 fl. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

ECYCLE. **Fibra de vidro: matéria-prima de muitos itens pode expor riscos no processo de produção**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/component/content/article/6-atitude/958-fibra-de-vidro-materia-prima-de-muitos-materiais-pode-expor-riscos-no-processo-de-producao.html>. Acesso em: 15 jul. 2019.

EKICI, B.; KENTLI, A.; KUÇUK, H. **Improving Sound Absorption Property of Polyurethane Foams by Adding Tea-Leaf Fibers**. *Archives of Acoustics*. Vol. 37, No. 4, pp. 515-520, 2012.

EMBRAPA. **Banana: o produtor pergunta a Embrapa responde / editores técnicos**. 2 ed. Rev. e Ampl. Brasília, Distrito Federal, 2012.

ETERNIT. **Painel Wall – Catálogo Técnico**. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/eternit/painel-wall.pdf>. Acesso em 30 jul. 2019.

FATIMA, S.; MOHANT, A. R. **Acoustical and Fire-retardant Properties of Jute Composite Materials**. *Applied Acoustics*. Vol. 72, pp. 108-114, 2011.

FERNANDES, J. C. **Acústica e ruídos**. Apostila do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP, Bauru, 2009.

FILHO, A. B. Onda. Disponível em: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=1197>. Acesso em 21 nov. 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. FAOSTAT. Roma: FAO, 2017. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>. Acesso em: 19 nov. 2019.

GADEA, B. J. M.; JULIÁ, S. E.; SEGURA, A. J.; MONTAVA, B. I. **Sustainable sound absorbers from fruit stones waste**. Applied Acoustics. Vol. 161, 2020.

GENTE DE FIBRA. **Fibras**. Disponível em: <http://www.gentedefibra.com.br/gentedefibra/catalogo/fibras>. Acesso em: 30 de jul. 2019.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. 1 ed. 600p. Florianópolis, 1992.

GLÉ, P.; GOURDON, E.; ARNAUD, L. **Acoustical Properties of Materials Made of Vegetable Particles with Several Scales of Porosity**. Applied Acoustics. Vol. 72, pp. 249-259, 2011.

GONÇAVES FILHO, L. C. **Utilização do pseudocaule da bananeira como substrato de fermentação alcoólica: avaliação de diferentes processos de despolimerização**. Dissertação de mestrado. Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2011.

HOWARD, C. Q.; CAZZOLATO, B. S. **Acoustic Analyses using MATLAB® and ANSYS®**. CRC press, Taylor & Francis Group, Broken, 2014.

IANNACE, G.; MAFFEI, L. TREMATERRA, P. **On the use of “Green Materials” for the Acoustic Correction of Classrooms**. Euronoise. Prague, 2012.

IANNACE, G. **The Acoustic Characterization of Green Materials**. Building Acoustics. Vol. 24, No. 2, pp. 101-113, 2017.

IASNICU, I.; VASILE, O.; IATAN, R.; TOMESCU, G. **Determination of Sound Absorption Coefficient for Plates and Layered Composite Material Made from Textile Waste and Cork**. Journal of Engineering Studies and Research. Vol. 21, No. 2, pp. 48-56, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Produção agrícola municipal, 2017. Disponível em: <https://ibge.gov.br/>. Acesso em: 19 nov. 2019.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade – LCA**. Disponível em: http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CETAC/laboratorios_e_sessoes/46laboratorio_de_conforto_ambiental_e_sustentabilidade___lca.htm. Acesso em: 16 abr. 2019.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 10534-1:1996**. Acoustic – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Method using standing wave ratio”. 1ª ed, 22 pp. 1996.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 10534-2:1998**. “Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 2: Transfer - Function Method”. Genève, Switzerland, 1998.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 354:2003**. “Measurement of sound absorption in a reverberant room”. 2003.

ISOMIL. **Lã de vidro**. Disponível em: <<http://www.isomil.com.br/la-de-vidro>>. Acesso em: 17 jul. 2019.

ISOVER. **Tratamento termoacústico de paredes**. Disponível em: <<https://www.isover.com.br/solucoes/tratamento-termoacustico-de-paredes>>. Acesso em: 17 jul. 2019.

JORDAN, W.; CHESTER, P. Improving the properties of banana fiber reinforced polymeric composites by treating the fibers. *Procedia Engineering*. Vol. 200, pp. 283–289, 2017.

JUNIOR, F. G. S. **Produção de Polpa Celulósica a partir de Engaço de Bananeira**. Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

KARAKY, H.; MAALOUF, C.; BLIARD, C.; GACON, A. EL WAKIL, N.; POLIDORI, G. **Characterization of Beet-pulp Fiber Reinforced Potato Starch Biopolymer Composites for Building Applications**. *Construction and Building Materials*. Vol. 203, pp. 711–721, 2019.

KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of acoustics**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 548p. New York, 2000.

KLIPPEL, F. S.; LABRES, H. S.; PACHECO, F.; CHRIST, R.; PIRES, J. R.; HEISLER, R. F.; OLIVEIRA, M. F. **Uso da lã de PET para a absorção sonora e o isolamento acústico**. *Acústica e Vibrações*. Revista da Sociedade Brasileira de Acústica (SOBRAC). No. 49, pp. 59-69, 2017.

KNAUF. **DRYWALL CLEANEO**. Disponível em: <https://knauf.com.br/produtos/drywall-cleaneo/>. Acesso em: 10 dez. 2019.

KOIZUMI, T.; TSUJUCHI, N.; ADACHI, A. **The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers**. *High Performance Structure and Composites*. 2002.

LATIF, H. A.; YAHYA, M. N.; RAFIQ, M. N.; SAMBU, M.; GHAZALI, M. I. **A Preliminary Study on Acoustical Performance of Oil Palm Mesocarp Natural Fiber**. *Applied Mechanics and Materials*. Vols. 773-774, pp. 247-252, 2015.

LE, A. T.; GACON, A.; LI, A.; MAI, T. H.; EL WAKIL, N. **Influence of various Starch/hemp Mixtures on Mechanical and Acoustical Behavior of Starch-hemp Composite Materials.** Composites Part B, Vol. 75, pp. 201-211, 2015.

MOHAMMADI, N.; MAHJOOB, M. J. **Transmission Loss of multilayer panels containing a fluid using progressive wave model: Comparison with impedance progressive model and experiments.** Comptes Rendus Mecanique, Vol. 337, pp. 198-207, 2009.

NETO, B. B.; SCARIMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** Campinas, SP. Editora da Unicamp, 2001.

NOR, M. J. M.; JAMALUDIN, N.; TAMIRI, F. M. **A Preliminary Study of Sound Absorption Using Multi-Layer Coconut Coir Fibers. Technical Acoustical.** Eletronic Journal Technical Acoustics. 2004.

OUTA, R.; CHAVARETTE, F. R.; BASQUEROTTO, C. H. C. C.; GONÇALVES, C. **Análise das Características de Absorção Acústica e Mecânicas das Fibras Vegetais Alongadas Mercerizada da Cana e Bambu.** Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecânica. Vol. 21, No. 2, pp. 73-84. Jul. 2017.

OUTA, R. **Estudo e análise do coeficiente de absorção acústico do compósito da fibra de cana.** 70 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

PÁEZ, D. A.; HERRERA, L. J.; ACOSTA, O. E.; HERRERA, M. **Evaluation of na acoustic conditioning panel made from typical Colombian fibres.** Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. No. 94, pp. 102-116, 2020.

PAULA, R. N. F. **Ondas longitudinais.** Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/ondas-longitudinais/>. Acesso em: 31 jan. 2020.

PFRETZSCHNER, J.; RODRIGUEZ, R. M. **Acoustic properties of rubber crumbs.** Polymer testing Vol. 18, pp. 81-92, 1999.

PITIMANEEYAKUL, U. **Banana Fiber: Environmental Friendly Fabric**. Proceedings of the Environmental Engineering Association of Thailand, 2009.

PUTRA, A.; ABDULLAH, Y.; EFENDY, H.; FARID, W. M.; AYOB, M. R.; PY, M. S. **Utilizing Sugarcane Wasted Fibers as a Sustainable Acoustic Absorber**. Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology. Procedia Engineering. pp. 63 –638. 2012.

RICCIARDI, P.; BELLONI, E.; COTANA, F. **Innovative panels with recycled materials: thermal and acoustic performance and life cycle assessment**. Applied Energy. Vol. 134, pp. 150-162. 2014.

RIENSTRA, S. W.; HIRSCHBERG, A. **An introduction to acoustics**. Eindhoven University of Technology. Mar, 2014.

SÁ, B. G. B. **Acústica de salas e bamboo laminado coaldo: ensaio de painéis para condicionamento acústico**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SAAD, M. J.; KAMAL, I. **Kenaf core particleboard and its sound absorbing properties** Journal of Science and Technology. Vol. 4, No. 2 pp. 23-34. 2013.

SAMBU, M.; YAHYA, M. N.; LATIF, H. A.; HATTA, M. N. M.; GHAZALI, M. I. B. **Preliminary study on acoustical and physical characteristics of Kenaf (Hibiscus Cannabinus) Using Natural Rubber as Binder**. Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 11, No. 4, pp. 2467-2474. Feb. 2016.

SANTOS, J. F.; SELIGMAN, L.; TOCHETTO, T. M.; **Conforto acústico na percepção de escolares alfabetizados**. Revista Sociedade Brasileira Fonoaudiol. Vol. 17(3), pp. 254-259. Fev. 2012.

SANTOS, J. L. P.; ALVES, C. C. S.; SIMOES, M. R. **Estudo dos materiais alternativos para uso em absorção acústica. ANTAC SOBRAC ABERGO. pp. 315-322, 1992.**

SHARIFUL, I.; SHAIKH, M.; MOMINUL, A. **Investigation of the acoustic properties of needle punched nonwoven produced of blend with sustainable fibers.** International Journal of Clothing Science and Technology. Vol. 30, No. 3, pp. 444-458, 2018.

SILVA, I. F. **Potencial do pseudocaule de bananeira (cultivar Prata anã) para a produção de etanol de segunda geração.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SOLTANI, P.; TABAN, E.; FARIDAN, M.; SAMAEI, S. E.; AMININASAB, S. Experimental and computational investigation of sound absorption performance of sustainable porous material: Yucca Gloriosa fiber. Applied Acoustics. Vol. 157, pp. 1 – 12, 2020.

TADEU, A.; MATEUS, D.; ANTONIO, J.; GODINHO, L.; MENDES, P. **Acústica aplicada.** Departamento Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

TAMOIS TECNOLOGIA. **IVAT.** Disponível em: <http://tamoioistecnologia.com.br/site/wp-content/uploads/2014/05/Clique-aqui.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2019.

TIUC, A. E.; VASILE, O.; GABOR, T. **Determination of Antivibrational and Acoustical Properties of Some Materials Made From Recycled Rubber Particles and Sawdust.** RJAC. Vol. 6, pp. 47-52 2014.

THILAGAVAHTI, G.; PRADEEP, E.; KANNAIAN, T.; SASIKALA, T. **Development of Natural Fiber Nonwovens for Application as Car Interiors for Noise Control.** Journal of Industrial Textiles. Vol. 39, No. 3, pp. 267-278, 2010.

THOLKAPPIYAN, S.; SARAVANAN, D.; JAGASTHITHA, R.; ANGESWARI, T.; SURYA, V. T. **Prediction of Acoustic Performance of Banana Fiber-reinforced Recycled Paper Pulp Composites.** Vol. 45, No. 6, pp. 1350–1363. 2016.

TRISOFT. **Manta de Pet Substitui Lã de Rocha e Lã de Vidro com Eficiência em Isolamento Térmico e Conforto Acústico.** Disponível em: <https://www.trisoft.com.br/manta-de-pet-substitui-la-de-rocha-e-la-de-vidro/>. Acesso em: 15 jul. 2019.

TUDOGEO. **Mapa dos Estados brasileiros em preto e branco.** Disponível em: <https://tudogeo.com.br/2019/02/23/mapa-dos-estados-brasileiros-em-preto-e-branco-para-colorir/>. Acesso em: 07 jan. 2020.

VEERAKUMAR, A.; SELVAKUMAR, N. **A Preliminary Investigation on Kapok/Polypropylene Nonwoven Composite for Sound Absorption.** Indian Journal of Fibre and Textile Research. Vol. 37, pp. 385-388. Dez. 2012.

VIEIRA, R. J. A. **Desenvolvimento de Painéis Confeccionados a Partir de Fibras de Coco para Controle Acústico de Recintos.** 262 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

XIANG, H. F.; WANG, D.; LIU, H. C.; ZHAO, N.; XU, J. **Investigation on Sound Absorption Properties of Kapok Fibers.** Chinese Journal of Polymer Science. Vol. 31, No. 3, pp. 521-529, 2013.

ZACK, J.; KORJENIC, A.; PETRÁNEK, V.; HROUDOVÁ, J.; BEDNAR, T.; Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. Energy Buildins. Vol. 49, pp. 246-253, 2012.

ZULKIFLI, R.; ZULKARNAIN; NOR, M. J. M. **Noise Control Using Coconut Coir Fiber Sound Absorber with Porous Layer Backing and Perforated Panel.** American Journal of Applied Sciences. Vol. 7, No. 2, pp. 260-264, 2010.

WASSILIEFF, C. **Sound absorption of wood-based materials.** Applied Acoustics. Vol. 48, No. 4, pp. 339-356, 1996.

APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS

- Características das amostras A e C de 30 mm de diâmetro:

AMOSTRAS 1				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
30	7	0,4	4948,008429	4,94801E-06
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			8,08406E-05	80,84060601

AMOSTRA 2				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
30	7	0,4	4948,008429	4,94801E-06
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			8,08406E-05	80,84060601

AMOSTRA 3				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
30	10	0,57	7068,583471	7,06858E-06
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			8,06385E-05	80,6385045

AMOSTRA 4				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
30	10	0,57	7068,583471	7,06858E-06
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			8,06385E-05	80,6385045

AMOSTRAS 5				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
30	7	0,595	4948,008429	4,94801E-06
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			0,00012025	120,2504014

AMOSTRA 6				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
30	7	0,595	4948,008429	4,94801E-06
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			0,00012025	120,2504014

AMOSTRA 7				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
30	10	0,85	7068,583471	7,06858E-06
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			0,00012025	120,2504014

AMOSTRA 8				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
30	10	0,85	7068,583471	7,06858E-06
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			0,00012025	120,2504014

- Características das amostras A e C de 60 mm de diâmetro:

AMOSTRAS 1				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
60	7	1,6	19792,03372	1,9792E-05
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			8,08406E-05	80,84060601

AMOSTRA 2				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
60	7	1,6	19792,03372	1,9792E-05
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			8,08406E-05	80,84060601

AMOSTRA 3				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
60	10	2,27	28274,33388	2,82743E-05
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			8,02848E-05	80,28482685

AMOSTRA 4				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
60	10	2,27	28274,33388	2,82743E-05
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			8,02848E-05	80,28482685

AMOSTRAS 5				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
60	7	2,38	19792,03372	1,9792E-05
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			0,00012025	120,2504014

AMOSTRA 6				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
60	7	2,38	19792,03372	1,9792E-05
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			0,00012025	120,2504014

AMOSTRA 7				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
60	10	3,4	28274,33388	2,82743E-05
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			0,00012025	120,2504014

AMOSTRA 8				
Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)	Volume (mm ³)	Volume (m ³)
60	10	3,4	28274,33388	2,82743E-05
			Densidade (g/mm ³)	Densidade (kg/m ³)
			0,00012025	120,2504014

APÊNDICE B – ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

- Resultados das simulações numéricas para análise de convergência de malha com o tubo de 60 mm:

Tubo Ø 60 mm					
Número de elementos	Tamanho (m)	Pressão sonora (Pa)	Tempo	Posição MIC1 (m)	Posição MIC2 (m)
20	0,100	2,2290	3 s	0,30000	0,40000
24	0,090	1,8520	3 s	0,33333	0,41666
28	0,080	1,6261	4 s	0,28570	0,42850
32	0,070	1,4796	4 s	0,31250	0,43750
36	0,060	1,3790	4 s	0,27770	0,44440
40	0,050	1,3070	4 s	0,30000	0,45000
52	0,040	1,1814	4 s	0,30760	0,46150
68	0,030	1,1055	4 s	0,29400	0,47050
500	0,020	1,0479	4 s	0,30000	0,46000
2200	0,010	1,0106	4 s	0,30000	0,47000
3136	0,009	1,0081	4 s	0,30350	0,47300
3528	0,008	1,0060	5 s	0,30150	0,47600
6624	0,007	1,0042	6 s	0,30550	0,47200
7728	0,006	1,0026	7 s	0,30950	0,47000
14800	0,005	1,0013	10 s	0,30000	0,47000
27625	0,004	1,0002	16 s	0,30000	0,47200
62124	0,003	0,9993	40 s	0,30230	0,47000
207250	0,002	0,9987	5 m 16 s	0,30000	0,47000

- Resultados das simulações numéricas para análise de convergência de malha com o tubo de 30 mm:

Tubo Ø 30 mm					
Quant. de elementos	Tamanho (m)	Pressão sonora no fim (Pa)	Tempo	MIC1 Pos.	MIC2 Pos.
800	0,0100	2,0320	4 s	0,32000	0,34000
900	0,0090	1,7186	4 s	0,32000	0,34663
1000	0,0080	1,5293	4 s	0,32000	0,34400
1856	0,0070	1,3509	5 s	0,32383	0,34450
2144	0,0060	1,2347	5 s	0,32238	0,34000
3250	0,0050	1,1365	5 s	0,32000	0,34000
5600	0,0040	1,0541	6 s	0,32000	0,34000
12328	0,0030	0,9852	8 s	0,32234	0,34000
44200	0,0020	0,9296	24 s	0,32000	0,34000
331200	0,0010	0,8823	10 m 4 s	0,32000	0,34000
471255	0,0009	0,8779	17 m 53 s	0,32000	0,34000
634000	0,0008	0,8737	29 m 17 s	0,32000	0,34000

APÊNDICE C – ANOVA E COMPARAÇÃO DE MÉDIAS

- Configuração 1 (amostras A)

- Análise de variância (ANOVA):

		100 Hz					125 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,003	0,000	0,35	2,66	0,913	Amostra	0,002	0,000	0,55	2,66	0,783
Resíduo	16	0,021	0,001				Resíduo	0,008	0,001			
Total	23	0,025					Total	0,010				

		160 Hz					200 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
	7	0,003	0,000	1,31	2,66	0,306	Amostra	0,002	0,000	2,62	2,66	0,052
Resíduo	16	0,005	0,000				Resíduo	0,002	0,000			
Total	23	0,007					Total	0,004				

		250 Hz					315 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,003	0,000	4,99	2,66	0,004	Amostra	0,002	0,000	8,67	2,66	0,000
Resíduo	16	0,001	0,000				Resíduo	0,001	0,000			
Total	23	0,005					Total	0,003				

		400 Hz					500 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,003	0,000	14,51	2,66	0,000	Amostra	0,004	0,001	4,14	2,66	0,009
Resíduo	16	0,001	0,000				Resíduo	0,002	0,000			
Total	23	0,004					Total	0,006				

		630 Hz					800 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,009	0,001	4,18	2,66	0,008	Amostra	0,010	0,001	6,92	2,66	0,001
Resíduo	16	0,005	0,000				Resíduo	0,003	0,000			
Total	23	0,014					Total	0,014				

		1000 Hz					1250 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,014	0,002	6,211	2,66	0,001	Amostra	0,020	0,003	8,58	2,66	0,000
Resíduo	16	0,005	0,000				Resíduo	0,005	0,000			
Total	23	0,0190					Total	0,025				

		1600 Hz					2000 Hz					
	GL	Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,027	0,004	12,55	2,66	0,000	Amostra	0,043	0,006	27,13	2,66	0,000
Resíduo	16	0,005	0,000				Resíduo	0,004	0,000			
Total	23	0,032					Total	0,047				

		2500 Hz					3150 Hz					
	GL	Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,088	0,013	24,92	2,66	0,000	Amostra	0,187	0,027	20,97	2,66	0,000
Resíduo	16	0,008	0,001				Resíduo	0,020	0,001			
Total	23	0,096					Total	0,207				

		4000 Hz					5000 Hz					
	GL	Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,386	0,055	21,56	2,66	0,000	Amostra	0,670	0,096	24,81	2,66	0,000
Resíduo	16	0,041	0,003				Resíduo	0,062	0,004			
Total	23	0,427					Total	0,732				

		6300 Hz				
	GL	Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	1,315	0,188	19,82	2,66	0,000
Resíduo	16	0,152	0,009			
Total	23	1,467				

- Comparação de média (Teste de Tukey):

	Grupo									
Amostra	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz
A1	A	A	A	AB	AB	BCD	BC	AB	AB	BC
A2	A	A	A	B	B	D	C	B	B	C
A3	A	A	A	AB	A	ABC	B	AB	AB	ABC
A4	A	A	A	AB	AB	CD	C	B	B	BC
A5	A	A	A	AB	A	AB	AB	AB	AB	AB
A6	A	A	A	AB	A	ABC	BC	AB	AB	BC
A7	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
A8	A	A	A	AB	AB	ABC	BC	B	B	BC

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

Amostra	Grupo								
	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
A1	B	BC	CD	DE	CD	C	B	B	B
A2	B	C	D	E	D	C	B	B	B
A3	AB	ABC	BC	BCD	CD	C	B	B	B
A4	B	BC	BCD	CDE	CD	C	B	B	B
A5	AB	AB	B	BC	BC	BC	B	B	B
A6	AB	BC	BCD	BCDE	CD	C	B	B	B
A7	A	A	A	A	A	A	A	A	A
A8	B	BC	BCD	B	B	AB	A	A	A

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

- Configuração 2 (amostras B): Coeficiente de absorção sonora.

- Análise de variância (ANOVA):

		100 Hz					125 Hz					
	GL	$\sum$ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		$\sum$ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,013	0,002	1,20	2,66	0,359	Amostra	0,009	0,001	1,90	2,66	0,137
Resíduo	16	0,025	0,002				Resíduo	0,011	0,001			
Total	23	0,038					Total	0,020				

		160 Hz					200 Hz					
	GL	$\sum$ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		$\sum$ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
	7	0,007	0,001	0,66	2,66	0,700	Amostra	0,008	0,001	0,39	2,66	0,895
Resíduo	16	0,025	0,002				Resíduo	0,047	0,003			
Total	23	0,032					Total	0,055				

		250 Hz					315 Hz					
	GL	$\sum$ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		$\sum$ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,013	0,002	0,43	2,66	0,869	Amostra	0,033	0,005	0,78	2,66	0,615
Resíduo	16	0,069	0,004				Resíduo	0,097	0,006			
Total	23	0,082					Total	0,130				

		400 Hz					500 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,100	0,014	1,91	2,66	0,134	Amostra	0,107	0,015	2,66	2,66	0,05
Resíduo	16	0,120	0,007				Resíduo	0,092	0,006			
Total	23	0,220					Total	0,198				

		630 Hz					800 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,060	0,009	2,84	2,66	0,040	Amostra	0,028	0,004	1,98	2,66	0,123
Resíduo	16	0,049	0,003				Resíduo	0,032	0,002			
Total	23	0,109					Total	0,060				

		1000 Hz					1250 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,029	0,004	3,12	2,66	0,028	Amostra	0,011	0,002	2,37	2,66	0,072
Resíduo	16	0,021	0,001				Resíduo	0,010	0,001			
Total	23	0,051					Total	0,021				

		1600 Hz					2000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,005	0,001	1,08	2,66	0,418	Amostra	0,008	0,001	2,54	2,66	0,058
Resíduo	16	0,010	0,001				Resíduo	0,007	0,000			
Total	23	0,015					Total	0,015				

		2500 Hz					3150 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,005	0,001	1,84	2,66	0,148	Amostra	0,007	0,001	3,42	2,66	0,020
Resíduo	16	0,006	0,000				Resíduo	0,005	0,000			
Total	23	0,010					Total	0,011				

		4000 Hz					5000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,006	0,001	2,31	2,66	0,078	Amostra	0,004	0,001	1,68	2,66	0,185
Resíduo	16	0,006	0,000				Resíduo	0,005	0,000			
Total	23	0,013					Total	0,008				

6300 Hz						
	GL	Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,006	0,001	1,60	2,66	0,207
Resíduo	16	0,008	0,001			
Total	23	0,014				

- Comparação de média (Teste de Tukey):

Amostra	Grupo									
	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz
B1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
B2	A	A	A	A	A	A	A	AB	AB	A
B3	A	A	A	A	A	A	A	AB	AB	A
B4	A	A	A	A	A	A	A	AB	AB	A
B5	A	A	A	A	A	A	A	AB	AB	A
B6	A	A	A	A	A	A	A	B	B	A
B7	A	A	A	A	A	A	A	AB	AB	A
B8	A	A	A	A	A	A	A	AB	AB	A

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

Amostra	Grupo								
	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
B1	A	A	A	A	A	AB	A	A	A
B2	A	A	A	A	A	B	A	A	A
B3	AB	A	A	A	A	A	A	A	A
B4	AB	A	A	A	A	AB	A	A	A
B5	AB	A	A	A	A	AB	A	A	A
B6	B	A	A	A	A	AB	A	A	A
B7	AB	A	A	A	A	AB	A	A	A
B8	AB	A	A	A	A	AB	A	A	A

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

- Configuração 2 (amostras B): Perda de transmissão sonora.

- Análise de variância (ANOVA):

		100 Hz					125 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	894,965	127,852	5,22	2,66	0,003	Amostra	598,826	85,547	4,60	2,66	0,005
Resíduo	16	391,678	24,480				Resíduo	297,649	18,603			
Total	23	1286,643					Total	896,475				

		160 Hz					200 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	797,933	113,990	3,66	2,66	0,015	Amostra	837,147	119,592	4,12	2,66	0,009
Resíduo	16	498,640	31,165				Resíduo	464,786	29,049			
Total	23	1296,573					Total	1301,934				

		250 Hz					315 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	1491,860	213,123	9,10	2,66	0,000	Amostra	1897,401	271,057	10,76	2,66	0,000
Resíduo	16	374,539	23,409				Resíduo	403,222	25,201			
Total	23	1866,398					Total	2300,623				

		400 Hz					500 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	2142,909	306,130	7,16	2,66	0,001	Amostra	1731,855	247,408	22,05	2,66	0,000
Resíduo	16	683,895	42,743				Resíduo	179,552	11,222			
Total	23	2826,805					Total	1911,407				

		630 Hz					800 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	1756,061	250,866	11,67	2,66	0,000	Amostra	1162,466	166,067	7,97	2,66	0,000
Resíduo	16	343,900	21,494				Resíduo	333,367	20,835			
Total	23	2099,961					Total	1495,833				

		1000 Hz					1250 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	739,180	105,597	2,65	2,66	0,050	Amostra	427,846	61,121	6,95	2,66	0,001
Resíduo	16	637,696	39,856				Resíduo	140,774	8,798			
Total	23	1376,876					Total	568,621				

		1600 Hz					2000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	146,155	20,879	1,50	2,66	0,237	Amostra	203,415	29,059	2,50	2,66	0,061
Resíduo	16	223,057	13,941				Resíduo	185,809	11,613			
Total	23	369,212					Total	389,224				

		2500 Hz					3150 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	162,344	23,192	1,43	2,66	0,261	Amostra	63,531	9,076	0,65	2,66	0,713
Resíduo	16	259,512	16,220				Resíduo	224,799	14,050			
Total	23	421,856					Total	288,330				

		4000 Hz					5000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	86,558	12,365	0,70	2,66	0,670	Amostra	214,102	30,586	2,96	2,66	0,034
Resíduo	16	281,321	17,583				Resíduo	165,609	10,351			
Total	23	367,879					Total	379,712				

		6300 Hz				
	GL	Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	341,313	48,759	2,85	2,66	0,039
Resíduo	16	274,145	17,134			
Total	23	615,458				

- Comparação de média (Teste de Tukey):

	Grupo									
Amostra	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz
B1	B	B	B	B	D	D	C	D	C	C
B2	AB	AB	AB	AB	ABC	ABC	ABC	BC	AB	ABC
B3	B	B	B	B	CD	CD	BC	D	C	BC
B4	AB	AB	AB	AB	ABC	AB	AB	AB	AB	AB
B5	B	B	AB	AB	BCD	BCD	BC	CD	BC	BC
B6	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	AB	A	AB
B7	B	AB	AB	AB	BCD	BCD	ABC	BC	BC	ABC
B8	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

Amostra	Grupo								
	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
B1	A	C	A	A	A	A	A	A	A
B2	A	BC	A	A	A	A	A	AB	AB
B3	A	ABC	A	A	A	A	A	AB	AB
B4	A	ABC	A	A	A	A	A	AB	AB
B5	A	A	A	A	A	A	A	AB	B
B6	A	AB	A	A	A	A	A	B	AB
B7	A	ABC	A	A	A	A	A	AB	AB
B8	A	A	A	A	A	A	A	AB	AB

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

- Configuração 3 (amostras C): Coeficiente de absorção sonora.

- Análise de variância (ANOVA):

		100 Hz					125 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,001	0,000	0,83	2,66	0,580	Amostra	0,001	0,000	1,59	2,66	0,209
Resíduo	16	0,003	0,000				Resíduo	0,001	0,000			
Total	23	0,004					Total	0,001				

		160 Hz					200 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
	7	0,000	0,000	2,38	2,66	0,072	Amostra	0,000	0,000	2,13	2,66	0,099
Resíduo	16	0,000	0,000				Resíduo	0,001	0,000			
Total	23	0,001					Total	0,001				

		250 Hz					315 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,000	0,000	4,49	2,66	0,006	Amostra	0,001	0,000	5,03	2,66	0,004
Resíduo	16	0,000	0,000				Resíduo	0,001	0,000			
Total	23	0,001					Total	0,002				

		400 Hz					500 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,002	0,000	10,09	2,66	0,000	Amostra	0,003	0,000	7,90	2,66	0,000
Resíduo	16	0,000	0,000				Resíduo	0,001	0,000			
Total	23	0,002					Total	0,004				

		630 Hz					800 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,003	0,000	5,80	2,66	0,002	Amostra	0,005	0,001	4,62	2,66	0,005
Resíduo	16	0,001	0,000				Resíduo	0,003	0,000			
Total	23	0,005					Total	0,008				

		1000 Hz					1250 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,014	0,002	6,58	2,66	0,001	Amostra	0,032	0,005	10,27	2,66	0,000
Resíduo	16	0,005	0,000				Resíduo	0,007	0,000			
Total	23	0,018					Total	0,039				

		1600 Hz					2000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,073	0,010	12,15	2,66	0,000	Amostra	0,102	0,015	20,00	2,66	0,000
Resíduo	16	0,014	0,001				Resíduo	0,012	0,001			
Total	23	0,087					Total	0,114				

		2500 Hz					3150 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,090	0,013	21,21	2,66	0,000	Amostra	0,221	0,032	20,40	2,66	0,000
Resíduo	16	0,010	0,001				Resíduo	0,025	0,002			
Total	23	0,100					Total	0,246				

		4000 Hz					5000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,620	0,089	22,61	2,66	0,000	Amostra	1,370	0,196	25,71	2,66	0,000
Resíduo	16	0,063	0,004				Resíduo	0,122	0,008			
Total	23	0,682					Total	1,492				

		6300 Hz				
	GL	Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	1,807	0,258	53,45	2,66	0,000
Resíduo	16	0,077	0,005			
Total	23	1,884				

- Comparação de média (Teste de Tukey):

Amostra	Grupo									
	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz
C1	A	A	AB	A	B	BC	C	BC	B	AB
C2	A	A	AB	A	B	C	C	BC	B	B
C3	A	A	AB	A	B	ABC	C	C	B	B
C4	A	A	B	A	AB	ABC	BC	ABC	B	AB
C5	A	A	AB	A	AB	ABC	ABC	AB	AB	AB
C6	A	A	AB	A	AB	ABC	ABC	AB	AB	AB
C7	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
C8	A	A	AB	A	AB	AB	AB	AB	AB	AB

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

	Grupo								
Amostra	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
C1	B	BC	BC	C	D	B	B	B	C
C2	B	C	C	C	D	B	B	B	BC
C3	B	BC	BC	C	D	B	B	B	BC
C4	AB	BC	BC	BC	CD	B	B	B	B
C5	AB	BC	BC	BC	BC	A	A	A	A
C6	A	A	A	A	AB	A	A	A	A
C7	A	A	A	A	A	A	A	A	A
C8	AB	AB	AB	AB	AB	A	A	A	A

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

- Configuração 4 (amostras D): Coeficiente de absorção sonora.

- Análise de variância (ANOVA):

		100 Hz					125 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,001	0,000	0,55	2,66	0,787	Amostra	0,002	0,000	2,65	2,66	0,050
Resíduo	16	0,004	0,000				Resíduo	0,002	0,000			
Total	23	0,005					Total	0,004				

		160 Hz					200 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
	7	0,001	0,000	1,12	2,66	0,400	Amostra	0,001	0,000	1,47	2,66	0,247
Resíduo	16	0,002	0,000				Resíduo	0,001	0,000			
Total	23	0,003					Total	0,002				

		250 Hz					315 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,000	0,000	0,93	2,66	0,511	Amostra	0,002	0,000	3,18	2,66	0,026
Resíduo	16	0,001	0,000				Resíduo	0,002	0,000			
Total	23	0,002					Total	0,004				

		400 Hz					500 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,004	0,001	2,64	2,66	0,051	Amostra	0,011	0,002	4,02	2,66	0,01
Resíduo	16	0,003	0,000				Resíduo	0,006	0,000			
Total	23	0,007					Total	0,017				

		630 Hz					800 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,036	0,005	4,59	2,66	0,006	Amostra	0,102	0,015	10,43	2,66	0
Resíduo	16	0,018	0,001				Resíduo	0,022	0,001			
Total	23	0,053					Total	0,125				

		1000 Hz					1250 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,521	0,074	17,59	2,66	0	Amostra	0,642	0,092	34,47	2,66	0,000
Resíduo	16	0,068	0,004				Resíduo	0,043	0,003			
Total	23	0,589					Total	0,684				

		1600 Hz					2000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,025	0,004	0,82	2,66	0,583	Amostra	0,075	0,011	3,46	2,66	0,019
Resíduo	16	0,070	0,004				Resíduo	0,050	0,003			
Total	23	0,095					Total	0,125				

		2500 Hz					3150 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,361	0,052	18,66	2,66	0,000	Amostra	0,189	0,027	7,56	2,66	0,000
Resíduo	16	0,044	0,003				Resíduo	0,057	0,004			
Total	23	0,405					Total	0,246				

		4000 Hz					5000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,053	0,008	5,12	2,66	0,003	Amostra	0,048	0,007	2,96	2,66	0,034
Resíduo	16	0,024	0,001				Resíduo	0,037	0,002			
Total	23	0,077					Total	0,086				

		6300 Hz				
	GL	Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	0,156	0,022	4,01	2,66	0,010
Resíduo	16	0,089	0,006			
Total	23	0,244				

- Comparação de média (Teste de Tukey):

	Grupo									
Amostra	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz
D1	A	A	A	A	A	B	A	B	B	C
D2	A	A	A	A	A	AB	A	AB	AB	BC
D3	A	A	A	A	A	AB	A	B	B	C
D4	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
D5	A	A	A	A	A	AB	A	AB	B	C
D6	A	A	A	A	A	AB	A	AB	AB	AB
D7	A	A	A	A	A	AB	A	AB	AB	ABC
D8	A	A	A	A	A	AB	A	AB	AB	A

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

Amostra	Grupo								
	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
D1	B	E	A	AB	A	A	A	A	A
D2	B	BC	A	AB	AB	A	A	B	B
D3	B	DE	A	AB	CD	B	AB	AB	AB
D4	A	AB	A	B	D	B	B	B	B
D5	B	DE	A	A	AB	AB	AB	AB	AB
D6	A	AB	A	AB	CD	B	B	AB	AB
D7	B	CD	A	AB	BC	AB	AB	AB	B
D8	A	A	A	AB	CD	AB	AB	AB	AB

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

- Configuração 4 (amostras D): Perda de transmissão sonora.

- Análise de variância (ANOVA):

		100 Hz					125 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	212,097	30,300	2,64	2,66	0,051	Amostra	127,416	18,202	1,14	2,66	0,389
Resíduo	16	183,857	11,491				Resíduo	255,991	15,999			
Total	23	395,954					Total	383,407				

		160 Hz					200 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
	7	104,697	14,957	1,19	2,66	0,361	Amostra	52,765	7,538	0,85	2,66	0,562
Resíduo	16	200,782	12,549				Resíduo	141,437	8,840			
Total	23	305,479					Total	194,202				

		250 Hz					315 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	64,994	9,285	1,13	2,66	0,390	Amostra	71,937	10,277	1,16	2,66	0,375
Resíduo	16	130,981	8,186				Resíduo	141,247	8,828			
Total	23	195,975					Total	213,184				

		400 Hz					500 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	137,914	19,702	3,08	2,66	0,030	Amostra	83,370	11,910	1,42	2,66	0,267
Resíduo	16	102,393	6,400				Resíduo	125,430	8,362			
Total	23	240,308					Total	208,810				

		630 Hz					800 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	92,514	13,216	1,86	2,66	0,145	Amostra	117,011	16,716	2,76	2,66	0,044
Resíduo	16	113,892	7,118				Resíduo	96,908	6,057			
Total	23	206,406					Total	213,919				

		1000 Hz					1250 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	188,943	26,992	3,63	2,66	0,015	Amostra	96,387	13,770	0,74	2,66	0,643
Resíduo	16	118,944	7,434				Resíduo	298,047	18,628			
Total	23	307,887					Total	394,434				

		1600 Hz					2000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	63,532	9,076	0,62	2,66	0,730	Amostra	85,733	12,248	1,07	2,66	0,427
Resíduo	16	233,052	14,566				Resíduo	183,513	11,470			
Total	23	296,584					Total	269,245				

		2500 Hz					3150 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	45,710	6,530	0,43	2,66	0,872	Amostra	125,800	17,970	0,90	2,66	0,534
Resíduo	16	245,602	15,350				Resíduo	301,200	20,080			
Total	23	291,312					Total	427,000				

		4000 Hz					5000 Hz					
	GL	Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value		Σdos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	53,140	7,591	0,29	2,66	0,948	Amostra	32,217	4,602	0,17	2,66	0,987
Resíduo	16	416,423	26,026				Resíduo	421,923	26,370			
Total	23	469,563					Total	454,140				

		6300 Hz				
	GL	Σ dos quad.	Quad. médio	F calc.	F tab.	p-value
Amostra	7	63,296	9,042	0,28	2,66	0,953
Resíduo	16	517,472	32,342			
Total	23	580,767				

- Comparação de média (Teste de Tukey):

	Grupo									
Amostra	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz
D1	A	A	A	A	A	A	B	A	A	B
D2	A	A	A	A	A	A	AB	A	A	AB
D3	A	A	A	A	A	A	AB	A	A	AB
D4	A	A	A	A	A	A	AB	A	A	AB
D5	A	A	A	A	A	A	AB	A	A	AB
D6	A	A	A	A	A	A	AB	A	A	AB
D7	A	A	A	A	A	A	AB	A	A	AB
D8	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.

	Grupo								
Amostra	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
D1	B	A	A	A	A	A	A	A	A
D2	AB	A	A	A	A	A	A	A	A
D3	AB	A	A	A	A	A	A	A	A
D4	AB	A	A	A	A	A	A	A	A
D5	AB	A	A	A	A	A	A	A	A
D6	AB	A	A	A	A	A	A	A	A
D7	AB	A	A	A	A	A	A	A	A
D8	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Obs.: Amostras com a mesma letra são significativamente iguais.