



SYLVIA THAIS MARTINS CARVALHO

***TRANSMISSION LOSS EM PAINÉIS AGLOMERADOS DE
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR *Saccharum officinarum* L.***

LAVRAS - MG

2017

SYLVIA THAIS MARTINS CARVALHO

***TRANSMISSION LOSS EM PAINÉIS AGLOMERADOS DE BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR *Saccharum officinarum* L.***

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Fábio Akira Mori
Orientador

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo
Prof. Dr. Lourival Marin Mendes
Coorientadores

LAVRAS - MG

2017

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Carvalho, Sylvia Thais Martins.

Transmission loss em painéis aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar *Saccharum officinarum L.* / Sylvia Thais Martins

Carvalho. - 2017.

134 p. : il.

Orientador(a): Fábio Akira Mori.

Coorientador(a): Giovanni Francisco Rabelo, Lourival Marin Mendes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Perda de transmissão. 2. Bagaço de cana. 3. Painel. I. Mori, Fábio Akira. II. Rabelo, Giovanni Francisco. III. Mendes, Lourival Marin. IV. Título.

SYLVIA THAIS MARTINS CARVALHO

***TRANSMISSION LOSS EM PAINÉIS AGLOMERADOS DE BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR *Saccharum officinarum* L.***

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 15 de Agosto de 2017.

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo	UFLA
Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro	UNICAMP
Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães	UFLA
Prof. Dr. Belisário Nina Hualpa	UFLA

Prof. Dr. Fábio Akira Mori
Orientador

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo
Coorientador

LAVRAS - MG

2017

Ao meu marido, Alysson e aos meus filhos, Lucas e Eduardo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, na pessoa de Jesus Cristo, autor e mantenedor da vida, por me conduzir neste processo de busca pelo conhecimento.

Agradeço aos meus pais ausentes, Idsel e Mafalda, que desde cedo me ensinaram um caminho sobremodo excelente.

Agradeço à minha família que, durante o percurso, incentivou-me a prosseguir.

Aos meus colegas, de curso, especialmente Amanda, que contribuiu ativamente em várias etapas do processo; à Jeimy, pelo apoio e amizade; ao Ney, pelas ajudas constantes no processo de obtenção e processamento de materiais; aos demais colegas de percurso que compartilharam suas habilidades para o sucesso da pesquisa.

Ao Vinícius, que não poupou esforços para a obtenção e montagem do experimento e pelo conhecimento acústico compartilhado.

À Jérelle, pela prontidão em me ajudar sempre que precisei.

Ao meu orientador, professor Fábio Akira, pelo crédito e confiança na aluna.

Ao professor Giovanni Rabelo, pela disponibilidade, instrução e amizade desde o início da pesquisa.

Ao professor Paulo Trugilho, pelo apoio e instrução no tratamento estatístico.

Ao professor Lourival, pelo legado que me permitiu aprofundar em tema tão importante.

À Raisa, que sempre me ajudou nos aspectos processuais durante o doutorado.

Aos demais professores, funcionários, técnicos que dispensaram sua atenção e me facilitaram a percorrer este caminho.

Aos laboratórios da UFLA, que abriram suas portas para a instrumentalização do trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Ciências Florestais e, em especial, ao programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, que concederam a oportunidade da pesquisa.

À CAPES, pela ajuda financeira.

Enfim, sou muito grata a todos que, de alguma forma, contribuíram para progresso dessa pesquisa.

Porque desde a antiguidade não se ouviu, nem com ouvidos se percebeu, nem com olhos se viu Deus além de ti, que trabalha para aqueles que nele espera.

Isaías: 64:4

RESUMO

O Estudo do desempenho acústico dos materiais é importante para a área de projeto de edificações no que se refere aos aspectos de ambiência. Os níveis elevados de pressão sonora em ambientes de trabalho comprometem a concentração e saúde auditiva dos trabalhadores, proporcionando reflexos negativos na produtividade. Materiais fibrosos são largamente aplicados em sistemas de absorção acústica e, nesse sentido, aliado à preocupação com as questões ambientais e de custo, neste trabalho utiliza-se e avalia-se um resíduo natural fibroso, biodegradável e renovável, como o painel aglomerado de bagaço de cana-de-açúcar, com o intuito de identificar a perda de transmissão sonora utilizando diferentes densidades e emprego de nanopartículas nas faces. Os painéis foram avaliados em minicâmaras reverberantes de vidro temperado em escala reduzida, nas quais o material foi testado na condição de divisórias, em multicamadas e diferentes espessuras. O modelo em escala reduzida visou a caracterizar o material em condições reais de simulação, nas quais as ondas difusas eram transmitidas. Os resultados mostraram forte correlação entre camada de ar e uso de nanopartículas em tratamentos com baixa densidade em média frequência, apresentando valores de perda de transmissão entre 25 a 45 dB. Constatou-se também o efeito positivo de dupla espessura em frequência baixa, para tratamentos com densidade maior, e em frequência média para tratamentos com menor densidade que atingiram valores de 20 a 40 dB, na faixa de 500 a 4000 Hz. Em altas frequências, os incrementos camada de ar e dupla espessura se mostraram eficientes nos tratamentos com baixa densidade. Para aqueles com densidade maior, apenas o efeito da camada de ar respondeu favoravelmente.

Palavras-chave: Perda de transmissão. Bagaço de cana. Painel. Câmara reverberante de vidro.

ABSTRACT

The study of the materials acoustic performance is important for a building design area with respect to ambience aspects. The high levels of sound pressure in the workplace compromise the workers' hearing health and also a concentration of these, with negative repercussions on productivity. Fibrous materials are widely applied in acoustic absorption systems, and in this sense, coupled with concern for environmental and cost issues, this work uses and evaluates a biodegradable and renewable fibrous natural waste was used, such as an aggregate panel of sugarcane residue, in order to identify the loss of sound transmission in panels with nanoparticles and different densities. The panels was tested in small-scale tempered glass reverberating chambers as partitions under different conditions of multilayers and thicknesses. The small-scale model aimed to characterize the material under real simulation conditions, in which diffuse waves were transmitted. The results showed a strong correlation between the layers of air and the use of nanoparticles in treatments with low density in medium frequency presenting transmission loss values between 25 and 45 dB. A positive effect of double thickness at a low frequency was also observed for treatments with higher density, and at average frequency for treatments with lower density, which reached values of 20 to 40 dB, in the range of 500 to 4000 Hz. At high frequencies, increments of layers of air and double thickness were efficient in low density treatments. For those with higher densities, it only responded favorably to the layers of air.

Key words: Transmission loss. Panel. Cane bagasse. Glass reverberating chamber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Propagação da onda sonora.	20
Figura 2 -	A) onda longitudinal; B) onda transversal; C) onda mista.	21
Figura 3 -	Tipos de sons: A) tom puro; B) som musical; C) ruído.	22
Figura 4 -	Curva de Gauss.	22
Figura 5 -	Tipos de ruído padrão.	23
Figura 6 -	Adaptado: Faixa de audibilidade humana.	24
Figura 7 -	Adaptado: Espectro sonoro.	24
Figura 8 -	Série de Fourier.	25
Figura 9 -	Fenômenos sonoros.	26
Figura 10 -	Reflexão especular.	27
Figura 11 -	Reflexão difusa.	27
Figura 12 -	Reverberação.	27
Figura 13 -	Difração.	29
Figura 14 -	Penetração da onda sonora em materiais com diferentes tamanhos de poros.	30
Figura 15 -	Padrões visuais de Chladni.	32
Figura 16 -	Interferência construtiva acima e destrutiva abaixo.	32
Figura 17 -	Diagrama dos regimes de perda de transmissão sonora em paredes simples.	33
Figura 18 -	Diagrama da Perda de transmissão no sistema massa-ar-massa.	35
Figura 19 -	Transmissão sonora.	36
Figura 20 -	Perda de transmissão em painéis duplos.	36
Figura 21 -	Transmissão sonora por 3 e 5 meios.	37
Figura 22 -	Modelo da estrutura molecular dos principais constituintes do material.	38
Figura 23 -	A) bagaço <i>in natura</i> ; B) lavagem; C) secagem ao ar livre; D e E) secagem em estufa.	44
Figura 24 -	A) moinho de martelo; B) partículas a peneirar; C) peneira de 8mm; D) peneira de 40mesh; E) moinho de disco; F) peneira de 60 mesh; G) pó; H) partículas na estufa.	45
Figura 25 -	A) pesagem das partículas; B) preparação do adesivo; c) mistura partícula/adesivo na encoladeira; D) formação do colchão de partículas; E) pré-prensagem manual.	45
Figura 26 -	A) bolo de partículas; B) limitação da espessura e cobrimento; C) prensagem a quente; D) parâmetros de prensagem.	46

Figura 27 - A) painel saído da prensa; B) painéis a serem cortados; C e D) painéis prontos na câmara de climatização.	46
Figura 28 - A) deslignificação; B) biodigestor; C) cozimento; D) polpa escura úmida; E) polpa escura seca; F) solução para o branqueamento; G) aquecimento; H) polpa clareada.	47
Figura 29 - Polpa branqueada (A e B).	47
Figura 30 - A) solução com polpa de bagaço de cana; B e C) processo de desfibrilação.	47
Figura 31 - Esquema de aspersão das nanopartículas no painel.	48
Figura 32 - A) ajuste da concentração; B) enchimento do reservatório; C e D) aspersão; E) amostras dos painéis por tratamento pulverizadas; F) estufa para secagem. ...	48
Figura 33 - A) bagaço de cana; B) maceração das fibras; C e D) montagem das lâminas. ...	49
Figura 34 - Montagem dos <i>stubs</i> para análise em MEV.	49
Figura 35 - Representação gráfica das câmaras reverberantes.	51
Figura 36 - Modelo 3D da estrutura.	51
Figura 37 - Abertura de acoplamento das câmaras (A); fechamento das câmaras sem painel (B); detalhe de montagem multicamadas entre as câmaras (C).	52
Figura 38 - Fixação do alto-falante em base de madeira na câmara emissora.	52
Figura 39 - Detalhe da proteção e delimitação das bordas das câmaras.	53
Figura 40 - (A) montagem com painel simples, 3 meios; (B) caixilho vazado separador da camada de ar, 5 meios; (C) e (D) montagem dos cinco meios.	53
Figura 41 - Apoio de borrachas para os painéis.	54
Figura 42 - Fonte geradora do sinal –Calibragem dos microfones.	54
Figura 43 - Esquema de montagem do experimento.	55
Figura 44 - Posicionamento dos microfones utilizando um feixe de <i>laser</i> (A) em relação aos planos horizontal; (B) vertical; (C) em relação ao plano lateral da câmara. ...	56
Figura 45 - (A) Apoio deslizante de ferro; (B) Rodízios de silicone; (C) Conjunto montado.	56
Figura 46 - Montagem final do experimento.	56
Figura 47 - Plano experimental – Painéis laboratoriais.	59
Figura 48 - Painéis utilizados na pesquisa.	59
Figura 49 - Plano experimental – Painéis industriais.	60
Figura 50 - Imagem de microscópio óptico das fibras de bagaço dispersas.	64
Figura 51 - Imagens da largura da fibra.	65
Figura 52 - TL baixa frequência - Linha 1 – 0 a 150 Hz.	67

Figura 53 - TL baixa frequência - Linha 2 – 0 a 150 Hz.....	67
Figura 54 - Deslocamento do mergulho de coincidência.....	69
Figura 55 - TL baixa frequência - Linha 3 – 0 a 150 Hz.....	70
Figura 56 - TL baixa frequência - Linha 1 – 150 a 500 Hz.....	71
Figura 57 - TL baixa frequência - Linha 2 – 150 a 500 Hz.....	71
Figura 58 - TL baixa frequência - Linha 3 – 150 a 500 Hz.....	71
Figura 59 - Ressonância de coincidência crítica na baixa frequência.....	72
Figura 60 - TL Média frequência – Linha 1- 500 a 1000 Hz.....	73
Figura 61 - TL Média frequência – Linha 2- 500 a 1000 Hz.....	74
Figura 62 - TL Média frequência – Linha 3- 500 a 1000 Hz.....	74
Figura 63 - TL Média frequência – Linha 1- 1000 a 4000 Hz.....	75
Figura 64 - TL Média frequência – Linha 2- 1000 a 4000 Hz.....	76
Figura 65 - TL Média frequência – Linha 3- 1000 a 4000 Hz.....	76
Figura 66 - TL Alta frequência – Linha 1- 1000 a 4000 Hz.....	79
Figura 67 - TL Alta frequência – Linha 2- 1000 a 4000 Hz.....	79
Figura 68 - TL Alta frequência – Linha 3- 1000 a 4000 Hz.....	79
Figura 69 - TL Alta frequência – Linha 1- 1000 a 4000 Hz.....	80
Figura 70 - TL Alta frequência – Linha 3- 1000 a 4000 Hz.....	80
Figura 71 - Efeito nanopartículas – camada de ar – 0 a 150 Hz.....	82
Figura 72 - Efeito nanopartículas – camada de ar – 500 a 2500 Hz.....	83
Figura 73 - MEV da face do painel com nanopartículas.....	84
Figura 74 - MEV da face do painel sem nanopartículas.....	85
Figura 75 - Efeito nanopartículas – dupla espessura – 0 a 150 Hz.....	85
Figura 76 - Efeito nanopartículas – dupla espessura – 500 a 2500 Hz.....	86
Figura 77 - Efeito nanopartículas – Camada de ar x Espessura – 2500 a 4000 Hz.....	86
Figura 78 - Efeito nanopartículas – Camada de ar x Espessura – 4000 a 20.000 Hz.....	87
Figura 79 - Efeito densidade – Camada de ar – 0 a 150 Hz.....	88
Figura 80 - Efeito densidade – dupla espessura – 0 a 150 Hz.....	88
Figura 81 - Efeito densidade– Camada de ar – 1.000 a 8.000 Hz.....	89
Figura 82 - Efeito densidade– dupla espessura – 800 a 8.000 Hz.....	89
Figura 83 - Efeito densidade– Camada de ar – 8.000 a 20.000 Hz.....	90
Figura 84 - Efeito densidade– dupla espessura – 8.000 a 20.000 Hz.....	90
Figura 85 - TL em divisórias de alumínio - 0.5mm x 1mm.....	91
Figura 86 - TL em divisórias de alumínio - 2mm.....	91

Figura 87 - Painéis industriais – dupla espessura – 2.000 a 20.000 Hz.	92
Figura 88 - Comparação de TL em painéis com diferentes camadas de ar.....	93
Figura 89 - Comparação de TL em painéis com diferentes tamanhos de camada de ar.	94
Figura 90 - Painéis de cana – laboratório x industrial – dupla espessura.....	95
Figura 91 – Painéis de cana – laboratório x industrial – espessura simples.	95
Figura 92 - Imagem obtida em MEV do painel de bagaço de cana de laboratório, 0,55 g/cm ³ com aumento de 800 x.	96
Figura 93 - Imagem obtida em MEV do painel de bagaço de cana industrial, 0,54 g/cm ³ com aumento de 1000x.....	96
Figura 94 - Painéis laboratoriais x industriais – camada de ar – 0 a 150 Hz.	97
Figura 95 - Painéis laboratoriais x industriais – espessura – 0 a 150 Hz.	98
Figura 96 - Painel laboratorial de cana – Imagem de MEV.	99
Figura 97 - Painel industrial de cana – Imagem de MEV.	99
Figura 98 - Painel laboratorial de cana – Imagem de MEV.	100
Figura 99 - Painéis laboratoriais x industriais – camada e ar – 500 a 1500 Hz.	101
Figura 100 - Painéis laboratoriais x industriais – dupla espessura – 500 a 1500 Hz.	102
Figura 101 - Painéis laboratoriais x industriais – camada de ar – 1500 a 4000 Hz.	102
Figura 102 - Painéis laboratoriais x industriais – dupla espessura – 1500 a 4000 Hz.	103
Figura 103 - Painéis laboratoriais x industriais – camada de ar – 4.000 a 12.000 Hz.	104
Figura 104 - Painéis laboratoriais x industriais – dupla espessura – 4.000 a 12.000 Hz.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de pressão sonora máximos permitidos para cada ambiente (dB).	38
Tabela 2 - Composição química do bagaço de cana-de-açúcar.	41
Tabela 3 - Características dimensionais da fibra do bagaço de cana-de-açúcar.	41
Tabela 4 - Dimensões da câmara reverberante.	50
Tabela 5 - Relação entre as dimensões da câmara.	50
Tabela 6 - Tempo de reverberação da câmara receptora.	57
Tabela 7 - Densidade aparente dos painéis industriais.	59
Tabela 8 – Tratamentos.	60
Tabela 9 - Dimensões da fibra de bagaço de cana.	64
Tabela 10 - Análise dos tratamentos por linha.	66
Tabela 11 - Teste de média - Testemunha – baixa frequência.	68
Tabela 12 - Teste de média – Camada de ar – baixa frequência.	68
Tabela 13 - Teste de média - testemunha – média frequência.	77
Tabela 14 - Teste de média - camada de ar – média frequência.	77
Tabela 15 - Teste de média - dupla espessura – média frequência.	77
Tabela 16 - Teste de média - testemunha – alta frequência.	81
Tabela 17 - Teste de média - dupla espessura – alta frequência.	81
Tabela 18 - Interações entre os tratamentos – nanopartículas.	82
Tabela 19 - Interações entre os tratamentos – densidade.	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO	18
3	HIPÓTESE.....	19
4	REFERENCIAL TEÓRICO	20
4.1	Características do som	20
4.2	Fenômenos sonoros.....	26
4.2.1	Reflexão sonora.....	26
4.2.2	Transmissão sonora	28
4.2.3	Absorção sonora	29
4.2.4	Ressonância	32
4.2.5	Inte rferência.....	32
4.3	Transmission loss.....	33
4.4	Transmissão através dos meios	35
4.5	Conforto acústico	37
4.6	Material pesquisado	38
4.6.1	Fibras celulósicas	38
4.6.2	Cana-de-açúcar	40
4.6.3	Bagaço de cana-de-açúcar	41
4.6.4	Estado da arte: fibras naturais para atenuação sonora.....	41
5	MATERIAL E MÉTODOS	44
5.1	Produção dos painéis	44
5.1.1	Tratamento do bagaço de cana e geração das partículas	44
5.1.2	Confecção dos painéis.....	45
5.1.3	Produção e aplicação de nano partículas de bagaço de cana	46
5.2	Caracterização da fibra de bagaço de cana-de-açúcar	48
5.3	Micrografias eletrônicas de varredura	49
5.4	Câmara reverberante	49
5.5	Montagem do experimento	54
5.6	Tempo de reverberação da câmara receptora	57
5.7	Determinação da propriedade <i>Transmission Loss</i>	58
5.8	Instrumentação	58
5.9	Plano experimental.....	58
5.10	Tratamentos	60
5.10.1	Descrição dos tratamentos	60
6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	63
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
7.1	Dimensões da fibra de bagaço de cana	64
7.2	Delineamento experimental	65
7.3	Análise geral: variável TL em função dos efeitos espessura e meios	66
7.3.1	Comparação entre os tratamentos na baixa frequência	66
7.3.2	Comparação entre os tratamentos na média frequência	73
7.3.3	Comparação entre os tratamentos na alta frequência	78
7.4	Análise dos resultados por tipo de efeito para a espécie bagaço de cana	81
7.4.1	Influência da presença e ausência de nanopartículas	81
7.4.2	Influência da densidade entre painéis laboratoriais.....	87
7.4.3	Influência da espessura no aumento de TL.....	90
7.4.4	Influência da camada de ar no aumento de TL.....	92
7.5	Comparação entre painéis laboratoriais e industriais	97

8	CONCLUSÕES	105
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A – Valores de <i>Transmission loss</i> em função da frequência para os 18 tratamentos	113
	APÊNDICE B – Gráficos: camada de ar x dupla espessura em painéis laboratoriais	114
	APÊNDICE C – Gráficos: camada de ar x dupla espessura em painéis laboratoriais x industriais	121
	APÊNDICE D – Tabelas de análise de variância e testes de média dos tratamentos	129

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ambiente tem reflexo direto sobre a qualidade de vida e saúde das pessoas. A exposição ao ruído por longos períodos causa efeitos colaterais como interferência no desempenho de tarefas chegando a problemas de saúde como irritabilidade, hipertensão, dores de cabeça, estresse, insônia e até perda auditiva. O comportamento do som no interior dos ambientes é influenciado por elementos de projeto como estrutura, tamanho e número de aberturas, espessura e constituição dos materiais que revestem as superfícies podendo ter características reflexivas ou absorvedoras e gerar efeitos sonoros como reverberação, ressonância, entre outros. Um bom desempenho acústico envolve desde o controle do som até a eliminação de ruídos internos e externos, bem como aspectos relacionados à inteligibilidade da fala.

No entanto, o avanço na tecnologia de edificações direcionadas a estruturas cada vez mais leves com foco na manutenção das condições de segurança estrutural gerou a redução da espessura de paredes e pisos resultando em perda de desempenho acústico dos ambientes construídos. Por isso, o conforto acústico tornou-se um dos critérios de projeto contemplado pelo sistema de normalização de edificações. Porém, normas como a NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003b), que definem os níveis de desempenho dos sistemas construtivos para atenuar a transmissão dos ruídos gerados nas edificações têm sido amplamente desrespeitadas pela indústria da construção civil, ainda que sob pena de responsabilização jurídica em caso de descumprimento. Isso ocorre em parte, pela onerosidade que o tratamento acústico convencional agrega ao empreendimento, mas também pelo desconhecimento de materiais que possam substituir os produtos convencionais.

Contudo, a conscientização ambiental que surgiu no final deste último século, propiciou o uso de recursos naturais de maneira mais racional e gerou iniciativas voltadas à criação de componentes construtivos eficientes, ecológicos e menos onerosos. Novos estudos sobre materiais alternativos que viabilizassem um modo de vida sustentável passaram a ser considerados. Os materiais convencionais utilizados para condicionamento acústico do ambiente possuem baixa densidade e regiões aeradas; são porosos como espumas de poliuretano e poliestireno ou constituídos de fibras como mantas de lã mineral. Materiais cujas características sejam similares aos convencionais e respondam positivamente a propriedades de controle do som, como a absorção e perda de transmissão sonora, têm sido estudados. É o caso das fibras naturais provenientes dos resíduos da agroindústria, que são de

natureza biológica gerados em grandes quantidades e se aproveitados, minimizam os impactos ambientais de descarte viabilizando o desenvolvimento sustentável.

Propriedades físicas e mecânicas de elementos que recebem resíduos agroindustriais, já têm sido alvo de pesquisas como reforço em painéis e matrizes cimentícias, por exemplo. Porém, quanto às propriedades térmicas e acústicas, verifica-se ainda a necessidade de estudos mais aprofundados no sentido de gerar possibilidades reais quanto a criação de elementos construtivos viáveis para produção em escala industrial. Entre os resíduos da agroindústria, destaca-se o bagaço de cana-de-açúcar, que apesar da disponibilidade abundante, ainda não é utilizado no Brasil para produção de painéis; embora o seja em outros países como China, Índia e Estados Unidos. Sua composição química é similar à da madeira de folhosas, podendo ser um possível substituto natural da madeira para confecção de painéis aglomerados. E por ser um material fibroso, com característica porosa deve ser considerado para investigação como um possível atenuador sonoro.

2 OBJETIVO

Avaliar a perda de transmissão sonora que, nesta pesquisa, será tratada como *transmission loss* em painéis aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar com diferentes densidades, espessuras e multicamadas, incorporados com nanopartículas de bagaço de cana-de-açúcar e compará-los com painéis de madeira aglomerada das espécies *Pinus sp.* e *Eucalipto sp.*

3 HIPÓTESE

O bagaço de cana-de-açúcar é um material fibroso e, como tal, pode influenciar na perda de transmissão sonora. Pressupõe-se que essa perda ocorra, em razão da vibração das fibras gerada pela pressão sonora na passagem da onda pelo material, transformando parte dessa energia em calor.

Como material poroso que é, presume-se que a proporção de micro cavidades abertas influenciará na atenuação sonora. A incorporação de nano partículas pretende verificar essa premissa e sua performance em diferentes faixas de frequências. O aumento da área superficial microporosa e a heterogeneidade morfológica do material biológico integram outros aspectos que podem sugerir reflexões múltiplas e atrito viscoso dentro da estrutura, proporcionando perda de transmissão sonora.

A utilização de multicamadas bem como dupla espessura visa a estabelecer parâmetros de correlação entre os diferentes materiais testados. Presume-se que, a eficiência acústica na perda de transmissão sonora é determinada pela associação entre diferentes faixas de frequência e configurações específicas de materiais e meios.

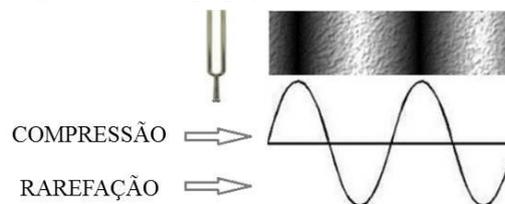
4 REFERENCIAL TEÓRICO

O desempenho acústico dos materiais está diretamente relacionado com suas características estruturais e morfológicas. A interação das ondas sonoras com os materiais varia de acordo com os meios que ela percorre, produzindo efeitos diversos em faixas específicas do espectro de frequência. Materiais e estruturas podem absorver, atenuar ou intensificar o som e por isso, são ferramentas importantes na gestão do ambiente acústico. O amortecimento de vibrações acústicas ocorre por meio de diferentes mecanismos. Quando a energia acústica é transmitida pelo ar e interage com uma estrutura sólida, a morfologia do material é um aspecto crítico na forma como ele interage com ela. A dissipação dessa energia pode se dar por processos como o atrito, transformado em calor, aprisionamento da onda em partes ocultas da estrutura ou vibração de elementos constituintes do material. Conceitos importantes para compreensão do comportamento do som serão elucidados a seguir.

4.1 Características do som

O som é resultado do movimento vibratório de matéria transmitido através de meios materiais e elásticos, gerando áreas de compressão e rarefação, conforme representado na Figura 1.

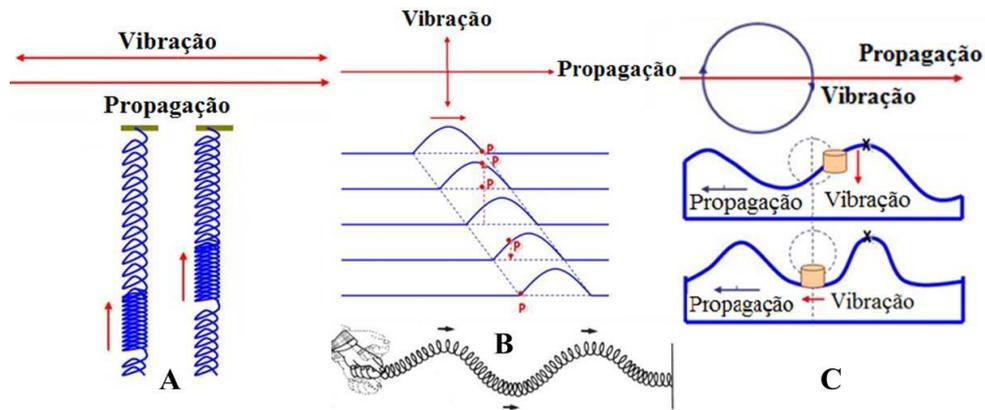
Figura 1 - Propagação da onda sonora.



Fonte: Estúdio Digital (2017).

Enquanto a radiação eletromagnética não requer um meio para viajar, o som é uma perturbação no próprio meio e é, por conseguinte, classificado como uma onda mecânica. Por meio elástico entendemos ser aquele que deformado, volta ao seu estado primitivo, logo que cessa a causa deformadora, como gases, líquidos e sólidos. A propagação da perturbação no meio elástico pode acontecer de formas longitudinal, transversal e mista. Ondas longitudinais oscilam paralelamente à direção de deslocamento, como em uma mola presa a um peso. Em ondas transversais, as vibrações são perpendiculares à direção de deslocamento; ondas do mar e as ondas eletromagnéticas são exemplos de ondas transversais. Ondas mistas possuem partículas que vibram longitudinal e transversalmente ao mesmo tempo, como as ondas do som nos sólidos, Figura 2.

Figura 2 - A) onda longitudinal; B) onda transversal; C) onda mista.



Fonte: Fernandes (2002).

Ondas de pressão viajam através do ar na velocidade do som e relaciona a frequência com comprimento de onda (comprimento de um único ciclo) através da equação (1):

$$c = \lambda f \quad (1)$$

Onde:

c = velocidade do som no ar (m/s)

λ = comprimento de onda (m)

f = frequência (Hz)

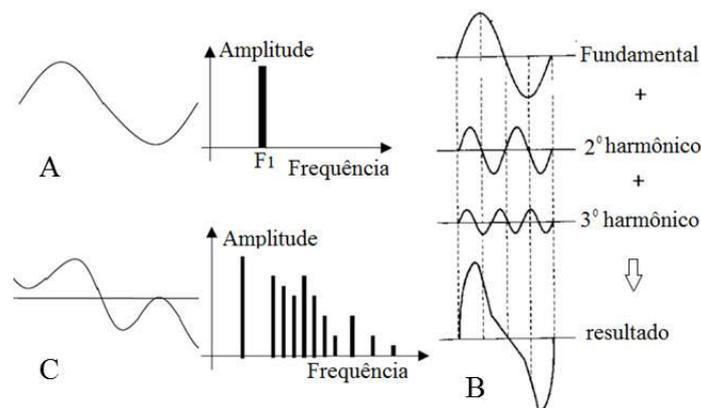
A velocidade do som no ar seco, em condições normalizadas (0°C, uma atmosfera de pressão) é de 331,5 m / s (LIDE, 2000). Nessas condições, uma onda acústica com frequência de 1 kHz terá um comprimento de onda de 0,3315 m.

A distância média da "molécula de ar" ao mover-se antes de colidir com outra é de 0,066 μm , em condições normalizadas (HUBBARD, 2002). A comparação desse comprimento de onda acústica com o percurso livre médio do ar mostra que as moléculas de ar podem mover-se apenas uma curta distância antes de colidir com outra molécula. Essas colisões molécula a molécula transferem a energia adiante e permitem que as ondas de pressão no ar percorram longas distâncias sem que haja grandes movimentos de moléculas individuais.

As colisões repetitivas ocorrem por meio de um mecanismo que provoca alteração "periódica" da pressão do ar gerando as ondas de pressão, que podem ser caracterizadas pela frequência (tempo entre pressões máximas) e amplitude (intensidade da mudança de pressão), podendo ter um padrão de repetição no tempo.

Os padrões podem ser periódicos e não-periódicos. Os periódicos podem ser: o tom puro, que possui apenas uma frequência e os sons musicais, que possuem uma frequência fundamental e somada a ela várias outras frequências com valores múltiplos inteiros gerando os harmônicos. O ruído é um fenômeno acústico não periódico sem componentes harmônicos definidos, resultantes da superposição de sons provenientes de várias fontes. É um espectro de banda larga que contém frequências graves, médias e agudas. Os padrões sonoros estão exemplificados na Figura 3.

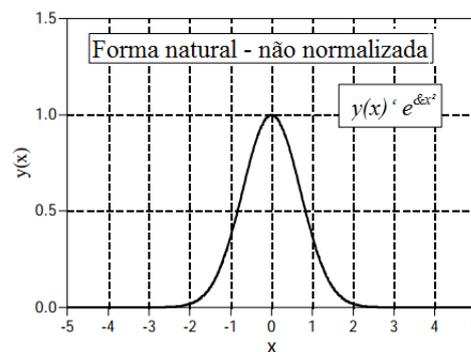
Figura 3 - Tipos de sons: A) tom puro; B) som musical; C) ruído.



Fonte: Fernandes (2009).

Os ruídos podem, no entanto, ser padronizados. O ruído aleatório é aquele cuja densidade espectral de energia se aproxima à distribuição de Gauss, Figura 4.

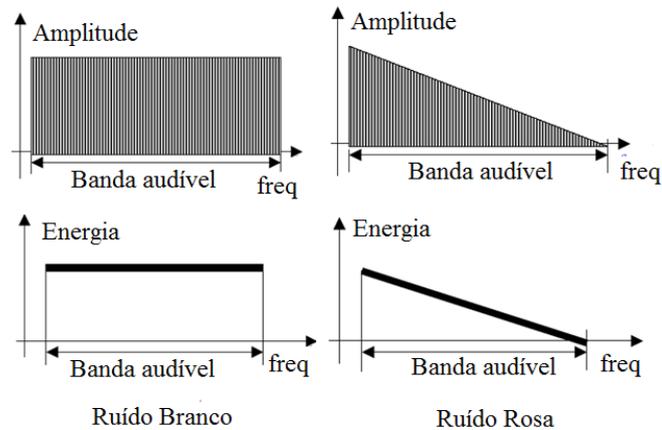
Figura 4 - Curva de Gauss.



Fonte: Smith (1997).

O ruído branco possui densidade espectral de energia constante para todas as frequências audíveis. O ruído rosa possui densidade espectral de energia proporcional ao inverso da frequência; o sinal decai 3 dB por banda e por isso é o que mais se aproxima da percepção auditiva humana, Figura 5.

Figura 5 - Tipos de ruído padrão.



Fonte: Fernandes (2009).

Os ruídos podem ser classificados em níveis de acordo com o efeito que provocam, desde a perda de qualidade do sono (acima de 40 dB), passando pela dificuldade na comunicação (45 dB), incômodo diurno moderado (50 dB), comunicação verbal extremamente difícil (65 dB), perda auditiva à longo prazo (70 dB), perda auditiva à curto prazo (110-140 dB). O Quadro 1 ilustra alguns tipos de ruído com as respectivas ponderações em dBA.

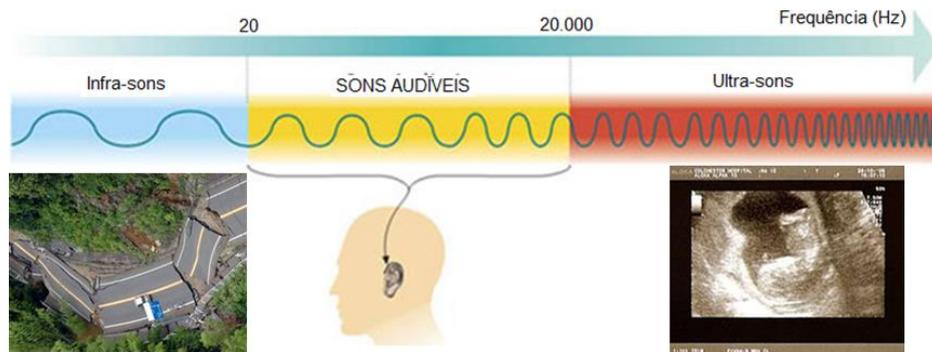
Quadro 1 - Níveis de ruído.

REPOUSANTE	INCOMODATIVO	FATIGANTE	PERIGOSO	LESIVO
0 dBA	50 dBA	80 dBA	100 dBA	120A dB
Dormitório 35 dB	Trânsito 70 dB	Indústria 85 dB	Britadeira 115 dB	Avião à jato 135 dB

Fonte: Simões (2011).

As ondas sonoras podem se propagar com diversas frequências, porém o ouvido humano é sensível somente às frequências na faixa entre 20 Hz e 20.000 Hz, comumente referida como frequência de áudio (SMITH, 1997). Figura 6.

Figura 6 - Adaptado: Faixa de audibilidade humana.

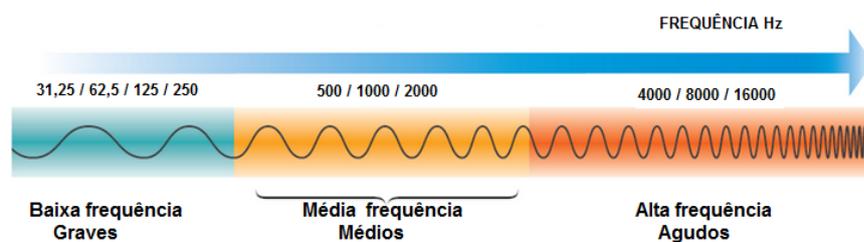


Fonte: Machado (2017).

No entanto, a sensibilidade a determinadas frequências pode ser afetada por várias condições, incluindo a idade e condição física. As frequências mais importantes para compreensão da fala estão tipicamente na faixa de 500-2048 Hz (STROBEL; WIGLEY; EVANS, 2009).

Dentro dos limites de audibilidade, o espectro de frequência possui três faixas distintas. Definido pelo Sistema Internacional de Unidades, o valor da frequência de referência é de 1000 Hz. Os sons de baixa frequência incluem as quatro oitavas inferiores, 31,5; 62,5; 125 e 250 Hz. Os de média incluem as três oitavas centrais, 500, 1.000 e 2.000 Hz. Os de alta frequência incluem as três oitavas superiores, 4.000, 8.000 e 16.000 Hz. Essas faixas estão exemplificadas na Figura 7.

Figura 7 - Adaptado: Espectro sonoro.

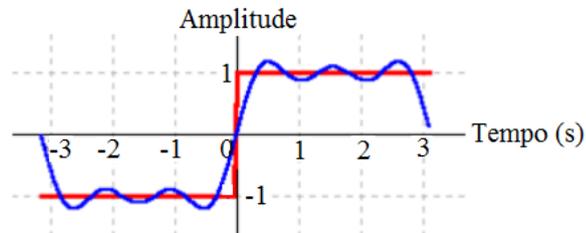


Fonte: Machado (2017).

As frequências e amplitudes que compõem uma onda individual não são facilmente analisadas pela observação da forma de onda, mas podem ser simplificadas por meio da Transformada de Fourier, em que qualquer função $f(x)$ pode ser representada na forma da soma de uma série de funções senoidais e cossenoidais. Um sinal complexo com funções periódicas pode ser decomposto em componentes elementares representados pela série de Fourier; e para funções não-periódicas, representadas por transformadas de Fourier

(FECHINE, 2010). Como exemplo, pode-se observar uma onda quadrada e abaixo dela a série de Fourier, Figura 8.

Figura 8 -Série de Fourier.



Fonte: Oliveira e Motta Junior (2009).

Quando uma onda de pressão encontra outro meio com superfície normal à direção de propagação da onda, parte dela é refletida, parte é absorvida e o restante é transmitido por meio do material para o novo meio. Para uma onda que se desloca através do meio 1 e encontra o meio 2, a razão entre a intensidade da onda refletida e a onda incidente é definida pela equação (2) (RANDALL, 2005).

$$\frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 \quad (2)$$

Onde:

I_r = Intensidade da onda refletida (W/m²)

I_i = Intensidade da onda incidente (W/m²)

ρ = Densidade do meio (Kg/m³)

c = Velocidade do som no meio (m/s)

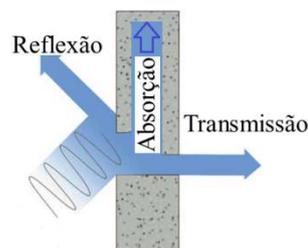
A amplitude é a distância entre uma crista e o eixo de propagação da onda e é caracterizada pela fonte sonora. Quanto maior for a vibração da fonte, maior será a amplitude da onda e maior a energia sonora ou intensidade do som. Os sons muito intensos são desagradáveis ao ouvido humano, pois a energia transmitida exerce sobre o tímpano uma pressão muito forte. São vários os efeitos que a exposição ao ruído pode causar no organismo humano, desde aspectos psicológicos e comportamentais como irritabilidade e perda de concentração até aspectos físicos como fadiga, alteração do sono, perda da memória, transtornos digestivos, aumento da frequência cardíaca, perda auditiva, entre outros (SIMÕES, 2014).

A Intensidade sonora representa a quantidade de potência (W/cm^2) ou pressão sonora ($1 \text{ dina}/\text{cm}^2$ ou BAR) que atravessa uma unidade de área. É a qualidade que permite caracterizar se um som é forte ou fraco e depende da energia que a onda sonora transfere. O nível, ou sensação de intensidade sonora, medido por *Grahan Bell* em uma escala logarítmica, corresponde à mínima variação de potência sonora detectável pelo ouvido humano. Segundo a lei de Weber, a relação entre intensidade sonora e sistema auditivo humano não é direta, pois quanto maior a intensidade sonora, menor será nossa sensibilidade auditiva. A sensibilidade auditiva obedece a uma escala logarítmica que vai do limiar de audibilidade (intensidade sonora de $10^{-16} \text{ W}/\text{cm}^2$ ou nível de intensidade sonora de 0 dB) até o limiar da dor (intensidade sonora de $10^{-2} \text{ W}/\text{cm}^2$ ou nível de intensidade sonora de 140 dB).

4.2 Fenômenos sonoros

Ao se propagar pelo meio, num espaço aberto ou dentro de uma sala, a onda sonora encontra obstáculos produzindo fenômenos que geram tanto qualidades como defeitos acústicos. Esses fenômenos são gerados pelas características espaciais e materiais do meio construído resultando em mudança de direção da onda, perda de energia sonora e passagem do som entre ambientes. Os principais fenômenos ligados ao comportamento espacial do som são: reflexão, absorção e transmissão, Figura 9.

Figura 9 - Fenômenos sonoros.



Fonte: Met@lica Construção Civil (2017).

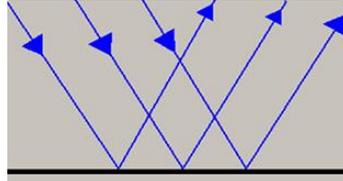
A reflexão pode gerar efeitos como difusão, eco e reverberação. Na transmissão, ocorre a difração. A absorção consiste na dissipação da energia sonora no material, no qual a onda incide. Existem também os fenômenos causados pela presença de mais de uma fonte sonora como a interferência, ou pela coincidência de frequências como reverberação.

4.2.1 Reflexão sonora

A incidência de ondas sonoras em uma superfície provoca reflexões, que podem ser de forma especular ou difusa. Na especular, quando a superfície é lisa e a onda é refletida obedecendo à lei da ótica, os ângulos de incidência e reflexão são iguais; na difusa, quando a

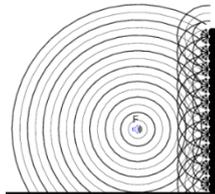
superfície é irregular, a onda se espalha gerando várias frentes de onda, refletindo em múltiplas direções, Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Reflexão especular.



Fonte: Brasil Escola (2017).

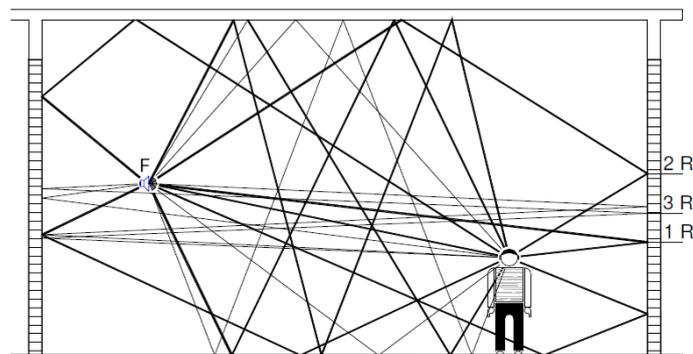
Figura 11 - Reflexão difusa.



Fonte: Bongestabs (2006).

A reflexão do som pode ocasionar os fenômenos como eco e reverberação. O eco ocorre quando se pode distinguir o som refletido do som direto. A reverberação ocorre quando a onda sonora atinge o observador no instante em que o som direto está se extinguindo, ocasionando o prolongamento da sensação auditiva por algum tempo depois de cessada a emissão. O tempo de reverberação é, por definição, o tempo necessário para que depois de cessada a fonte, o nível sonoro caia 60 dB. Se for inferior a 0,1 s, tempo entre o impulso sonoro e a sensação auditiva provocada por ele no ouvido humano, ocorrerá reverberação. Figura 12.

Figura 12 - Reverberação.



Fonte: Bongestabs (2006).

As pesquisas de W.C. Sabine (EVEREST; POHLMANN, 2009) levaram a uma relação empírica para o tempo de reverberação (τ), proporcional ao volume (V) da sala e inversamente proporcional a absorção da superfície (A). Relação descrita pela equação (3):

$$\tau = 0,16 \frac{V}{A} \quad (3)$$

onde:

τ = Tempo de reverberação (segundos)

V = volume da sala (m³)

A = absorção da superfície (m² ou *sabins*)

A absorção da superfície por sua vez é definida pela equação 4:

$$A = \alpha S \quad (4)$$

onde:

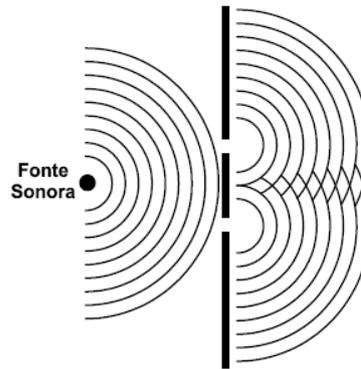
α = coeficiente de absorção do material

S = superfície da área de absorção (m²)

4.2.2 Transmissão sonora

A propagação da onda sonora encontra forças friccionais que alteram sua amplitude, fazendo com que diminua com o tempo e a distância da fonte sonora. Se não houver algum obstáculo no caminho da onda obstáculo que se interponha a sua passagem, bloqueando-a, essa condição é denominada de transmissão em campo livre. Caso haja um obstáculo em sua trajetória, parte da onda será transmitida, passando pelo obstáculo e formando novas frentes de onda a partir dos orifícios que encontra. Se os meios de origem e transmissão forem os mesmos ocorrerá a difração. Se o tamanho do orifício coincidir com o comprimento de onda (λ), as novas frentes de onda serão iguais à anterior, Figura 13.

Figura 13 – Difração.



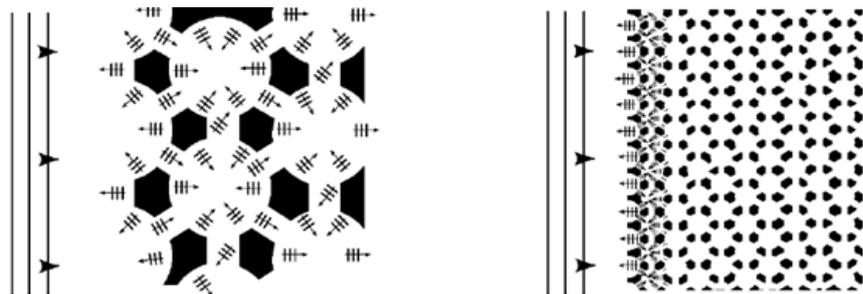
Fonte: Bongestabs (2006).

4.2.3 Absorção sonora

A absorção é a propriedade que alguns materiais possuem de dissipar a energia sonora sobre eles. Em materiais fibrosos, a energia sonora provoca o movimento vibratório das fibras e é convertida em calor; em materiais porosos, o som é refletido inúmeras vezes nos poros até que se dissipe. O próprio material constitui um novo meio, pelo qual a onda passa, ocorrendo mudança em sua direção e velocidade. Essas mudanças podem variar de acordo com aspectos como espessura, densidade, rigidez e morfologia do material no qual penetrou. Dessa maneira, o material pode ter características isolantes (com mais reflexões), atenuadoras (com retenção parcial do som no próprio material) ou absorvedoras (com retenção majoritária da onda sonora). A morfologia é um aspecto importante na forma como o som interage com o material. A capacidade de resistência à passagem da onda sonora pelo material é a parte real do complexo da impedância característica e a reatância a parte imaginária. Na literatura, quando a reatância característica é zero, o termo "impedância característica" pode mais comumente ser usado como "resistência característica". Quanto maior a diferença na resistência característica entre os dois meios, mais energia é refletida. Um exemplo disso é a sílica fundida. A densidade do ar seco em condições padrão é de 1,34 kg/m³, de modo que o ρc do ar é de 444,2 Pa·s/m. A densidade de sílica fundida é de 2210 kg/m³ e a velocidade do som é de 5.968 m/s, originando um valor de ρc de 1.32 x10⁷ Pa·s/m. Usando esses valores na equação (2) tem-se um valor para $\frac{I_r}{I_i}$ de 0,9999, o que significa que 99,99% da energia é refletida pela superfície da sílica e apenas 0,01% é transmitida (ASO; KINOSHITA, 1963a, 1963b). A dissipação de energia sonora em meios diferentes pode ocorrer por meio de tensões viscosas causadas pelos choques entre as moléculas do fluido que convertem energia cinética em calor e passam para o interior de uma estrutura sólida por condução.

O impacto de uma onda de pressão acústica em uma estrutura sólida pode dissipar a energia por meio da flexão dessa estrutura. Se a superfície sólida for não porosa, a energia incidente será refletida para o ambiente. Se for pouco porosa, à medida que o tamanho dos poros diminuir menos energia será transferida para dentro da estrutura e a maior parte será refletida a partir da superfície. No entanto, se a porosidade da superfície for maior, uma porção substancial da onda de pressão penetrará no material antes de encontrar uma superfície sólida e o elevado número de reflexões internas pode dissipar a energia transferida. Essa dissipação é essencial para o desempenho de absorvedores acústicos formados a partir de materiais tais como fibras de vidro, polímeros e espumas. A fim de atingir um grande número de interações, a onda de pressão deve penetrar profundamente no material de modo que não sejam imediatamente refletidas para o ar circundante (KUCZMARSKI; JOHNSTON, 2011). Isso pode ser ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Penetração da onda sonora em materiais com diferentes tamanhos de poros.



Fonte: Kuczmariski e Johnston (2011).

É importante observar que nem todos os materiais altamente porosos são adequados como absorvedores acústicos. Se o percurso médio livre do ar (comprimento de onda) é da mesma ordem ou maior que a distância média entre as paredes dos poros, ondas de pressão não serão capazes de penetrar de forma eficiente no material. Nesse caso, mesmo que o material tenha uma célula com estrutura aberta, irá se comportar como um material de célula fechada. Se, por outro lado, os poros do material forem muito grandes, a onda de pressão passará por meio dele com a mínima interação em relação à estrutura. Se a porosidade é demasiado fina, a maioria da energia refletirá para o ambiente a partir de uma região na vizinhança imediata da superfície, sem entrar profundamente o suficiente para sofrer as interações múltiplas com a estrutura, de forma a absorver uma fração substancial da energia.

Espuma é um exemplo de material poroso, que possui um grande número de bolhas de gás aprisionado por todo o volume. É considerada de células abertas quando os poros

formados pelas bolhas de gás interconectadas não possuem barreiras entre elas; a estrutura sólida entre as bolhas individuais está na forma de ligamentos. Em espumas de células fechadas, cada bolha tem paredes intactas; os volumes internos das bolhas individuais não se comunicam. Em vez de penetrar no interior da espuma, a onda de pressão acústica reflete a partir da superfície exterior. Em espumas de células fechadas, as bolhas são partículas ocas dispersas adicionadas na matriz sólida. São tipicamente usadas como isolantes acústicos. Para que um material seja um absorvedor acústico eficiente, deve haver uma estrutura de transferência da energia para dentro dele e porosidade aceitável, de modo que as ondas sonoras possam penetrar suficientemente longe na estrutura para permitir várias interações com em seu interior. Qualquer característica do material da matriz sólida que aumente a transferência de energia do ar para dentro da estrutura dissipando-a pode melhorar o seu desempenho como um absorvedor acústico.

Os mecanismos de amortecimento de energia no sólido, perdas por atrito e perdas viscosas entre o ar nos poros e os ligamentos sólidos convertem a energia acústica em calor. A absorção eficiente do som a partir do ar depende também de uma estrutura de poros abertos. Deve haver vias interligadas para o ar que atinja a superfície, como um complexo emaranhado de fibras que resultem em uma estrutura de poros abertos. Segundo Cox e D'Antonio (2005), absorventes precisam ter no mínimo um décimo do comprimento de onda de espessura para absorver de forma significativa o som incidente, e um quarto de comprimento de onda para absorver todo o som. A absorção de baixa frequência geralmente aumenta com a espessura do absorvedor poroso.

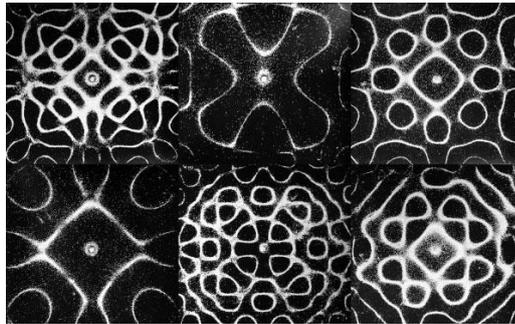
A maioria dos materiais absorvedores são homogêneos e isotrópicos, o que significa que as suas propriedades são uniformes no espaço. Essa uniformidade dos materiais permite que seu desempenho seja mais facilmente previsível. A falta de homogeneidade pode surgir a partir de uma alteração na composição do espaço dentro da estrutura ou a inclusão de regiões de um segundo material. Essa mudança na composição gera mudança nas propriedades, que conduz a um comportamento anisotrópico. Muitos materiais reforçados com fibra mostram alguma anisotropia nas suas propriedades, as quais são dependentes da orientação das fibras. A fibra de materiais celulósicos, por exemplo, pode gerar diferentes propriedades acústicas por apresentar dimensionamentos diferentes em relação ao comprimento, diâmetro, espessura e lume.

4.2.4 Ressonância

O fenômeno da ressonância ocorre quando a fonte emite um som com frequência igual à frequência de vibração natural do material.

A amplitude do movimento vibratório induzido no material coincidindo com a frequência da fonte produz superposição de ondas e o sistema passa a vibrar com amplitudes específicas. A vibração sonora produz efeitos visuais diferentes representados por figuras geométricas cujos formatos dependem da frequência de vibração. À medida que a frequência de vibração do material varia, variam as formas geométricas formadas pela areia sobre ele indicando as regiões dos nós de vibração. Quanto maior a frequência, mais complexo os padrões das figuras formadas. Esses efeitos podem ser observados na Figura 15.

Figura 15 - Padrões visuais de Chladni.

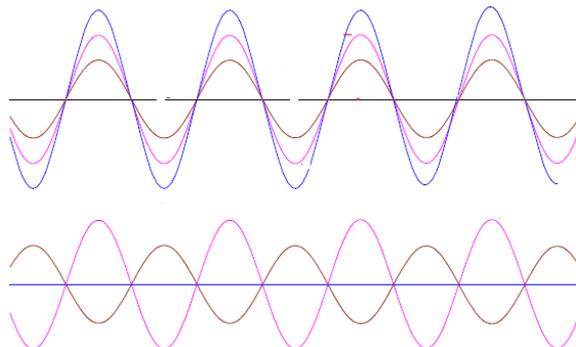


Fonte: Epoch Times (2017).

4.2.5 Interferência

A interferência ocorre quando há sobreposição de duas ondas sonoras de mesma frequência que podem estar em fase ou não. Se estiverem em fase, o resultado será o reforço; mas se estiverem fora de fase ocorrerá o enfraquecimento do som, nesse caso necessariamente a partir de duas fontes sonoras, Figura 16.

Figura 16 - Interferência construtiva acima e destrutiva abaixo.



Fonte: Bongestabs (2006).

4.3 Transmission loss

Existem muitos termos que podem ser usados quando se considera redução de ruído para aplicação em edificações. Um deles é “*Transmission loss*” (TL), uma das mais importantes mensurações na determinação da eficiência dos materiais em isolamento sonoro. É a quantidade de decibéis barrados por uma parede ou estrutura em uma dada frequência. TL é uma referência ou parâmetro representado por números inteiros, que derivam de valores testados em uma classe de transmissão sonora STC (*sound transmission class*), limitada a dezesseis frequências padrão no intervalo de 125 Hz a 4.000 Hz. No Quadro 2, mostram-se alguns valores de referência de STC e seus respectivos efeitos.

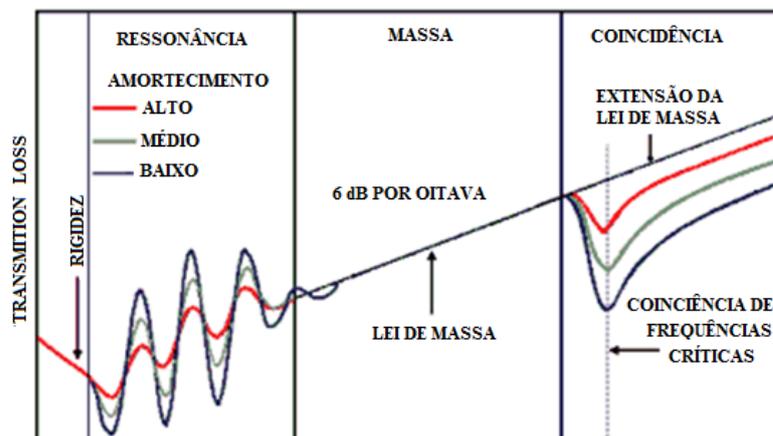
Quadro 2 - Classe de valores STC e correspondência auditiva.

STC	O QUE PODE SER OUVIDO
25	A fala normal pode ser compreendida, fácil e claramente através da parede
30	Fala alta pode ser entendida bem; Fala normal pode ser ouvida mas não entendida
35	Fala alta é audível, mas não compreensível
40	Início da privacidade
42	Fala alta é audível apenas como murmúrio
45	Fala alta não audível
50	Sons muito altos como instrumentos musicais ou aparelho de som podem ser ouvidos de longe

Fonte: Bistafa (2006).

A perda de transmissão sonora varia em função da frequência e a transmissão pelo material apresenta um espectro diferente para cada tipo de região percorrida pela onda. Na Figura 17, é possível identificar quatro regiões distintas em que as características dos painéis se relacionam com os efeitos produzidos pela onda sonora.

Figura 17 - Diagrama dos regimes de perda de transmissão sonora em paredes simples.



Fonte: Méndez (1994), adaptado.

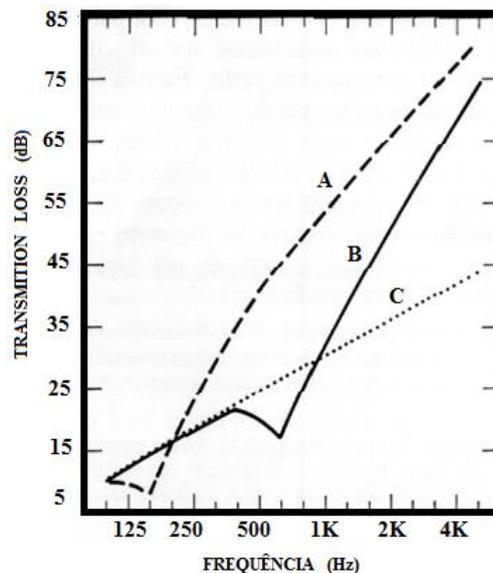
A primeira região é controlada pela rigidez à flexão e ocorre para frequências muito baixas (normalmente abaixo de 20 Hz) em que o painel vibra como um todo e a perda de transmissão sonora decresce a uma taxa de 6 dB por oitava. Na segunda região, controlada pelo amortecimento do painel, ocorre perda de transmissão decorrente das frequências de ressonância, que geram grandes oscilações. Na terceira região controlada pela massa, ocorre o efeito inverso da rigidez, pois ocorre um aumento de 6 dB a cada duplicação da frequência ou da massa do painel. Na quarta região, a perda de transmissão é reduzida pela coincidência, em que o comprimento da onda acústica projetada na estrutura se iguala ao comprimento da onda de flexão do painel (GERGES, 1992).

O regime mais importante em insonorização é a lei de massa. Cada vez que a massa por unidade de área de uma parede de camada única é dobrada, a perda de transmissão é aumentada em cerca de 6 dB. Pode-se também dobrar a espessura da parede ou selecionar um material que tenha densidade duas vezes maior. Em ambos os casos, a insonorização poderá melhorar a perda de transmissão em 6 dB. A lei de massa também diz que se a frequência é dobrada, a perda de transmissão é aumentada em 6 dB. Em outras palavras, as baixas frequências demandam paredes mais maciças para serem isoladas. Baixas frequências percorrem ou caminham pelos materiais, fazendo-os vibrar. É por isso o efeito acústico de baixas frequências gera um tipo de ruído abafado. O outro regime importante a se considerar, tratando-se de painéis de madeira, é o efeito de coincidência. Materiais com grande rigidez apresentam mergulhos acentuados em faixas de frequência específicas e têm a perda de transmissão reduzida. Normalmente, quanto mais rígido for o material, mais íngreme o mergulho. Por exemplo, a madeira compensada tem um mergulho de coincidência mais profundo do que o aglomerado, pois é mais rígida. A profundidade e a largura do mergulho de coincidência são determinadas por perdas de energia sonora na transferência de energia para a estrutura do material. Quanto maiores as perdas, mais raso e mais largo o mergulho de coincidência. O mergulho de coincidência pode ser deslocado na gama de frequências. Isso ocorre alterando a rigidez, as condições de contorno, a espessura do material ou a associação de camadas. Por exemplo, se duas camadas de material forem coladas se comportarão como uma única camada espessa com redução associada da frequência de coincidência. Se as camadas forem apenas mantidas juntas, porém soltas (com parafusos, ou pressionadas, por exemplo) de modo que possa haver movimentação de umas sobre as outras, a frequência de coincidência será movida e o atrito entre as camadas poderá introduzir energia extra, diminuindo as perdas de transmissão perto da zona de coincidência. O mergulho de coincidência é causado por ondas de flexão que se deslocam longitudinalmente ao longo de

uma parede ou painel. Quando a coincidência ocorre, a transferência de energia entre os lados do painel é mais eficiente, daí o mergulho de coincidência ocorrer em frequências críticas.

Já no regime de ressonância, as baixas frequências não são tão sensíveis ao ouvido e o efeito é um som grave característico. Como uma corda, os painéis também começam a vibrar sobre uma frequência fundamental, que é a primeira e a maior das frequências de ressonância. Depois disso, cada harmônico seguinte é um pouco mais fraco do que o anterior. As ressonâncias derivam da mesma razão que o mergulho de coincidência, a rigidez do painel. Portanto, podem ser diminuídas da mesma maneira que o mergulho de coincidência adicionando amortecimento, que pode ser obtido aplicando um material viscoso na superfície do painel ou entre painéis. Na Figura 18, mostra-se um exemplo do benefício que se pode obter com paredes duplas. A curva C representa a predição de lei de massa para uma única chapa de aço de 1 mm; as outras duas consistem de: (A) duas chapas de aço de 0,5 mm com 100 mm de espaço de entre elas e (B) uma chapa de 5 mm.

Figura 18 - Diagrama da Perda de transmissão no sistema massa-ar-massa.



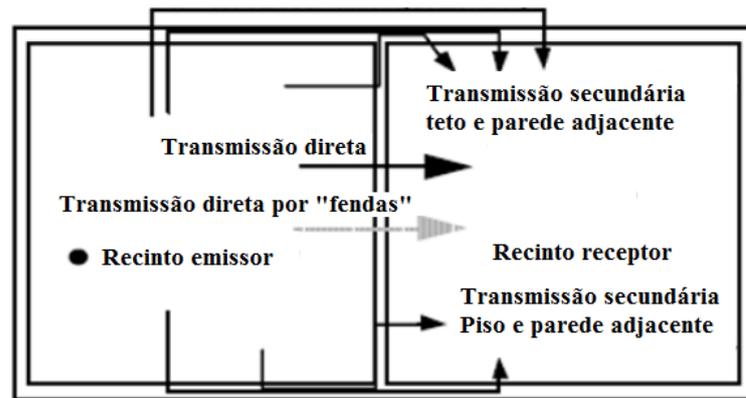
Fonte: Mendéz (1994).

As frequências baixas demonstram ser o maior problema. No entanto, a eficiência da camada de ar, já na baixa frequência e da maior espessura, a partir da média frequência, subsidiam a importância de alterações das condições iniciais na perda de transmissão sonora.

4.4 Transmissão através dos meios

A transmissão sonora pode ocorrer de maneira direta, pelo elemento separador entre os ambientes, mas também de maneira indireta, marginal, através da estrutura, Figura 19.

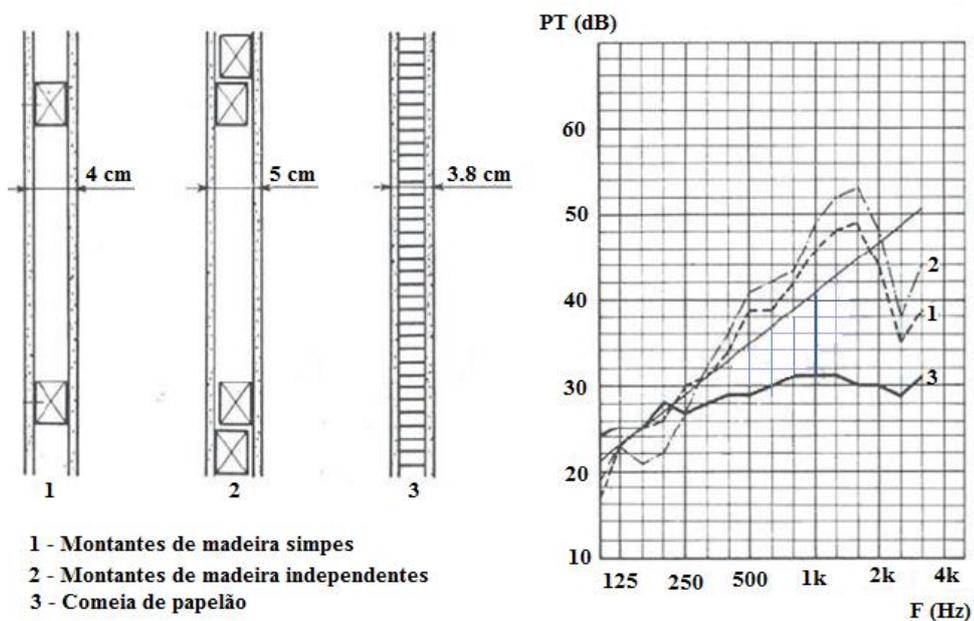
Figura 19 - Transmissão sonora.



Fonte: Michauski (2015).

A transmissão direta, contendo um elemento separador entre o ambiente emissor e o receptor, é denominada de transmissão de três meios, quando o fluido inicial é igual ao fluido final. Nesse caso, a transmissão dependerá prioritariamente da densidade do material e da frequência da onda incidente (GERGES, 1992). Porém, uma das maneiras de se obter maior perda de transmissão sonora é por meio da utilização de cinco meios. Quando dois elementos vedantes estão afastados ou isolados entre si, a perda de transmissão é igual ou maior do que a soma aritmética dos dois juntos. Josse (1975), em seu livro *La acustica en la construcción*, apresenta o índice de enfraquecimento de uma divisória dupla a base de painéis de gesso acartonado com três tipos de fixação, Figura 20.

Figura 20 - Perda de transmissão em painéis duplos.

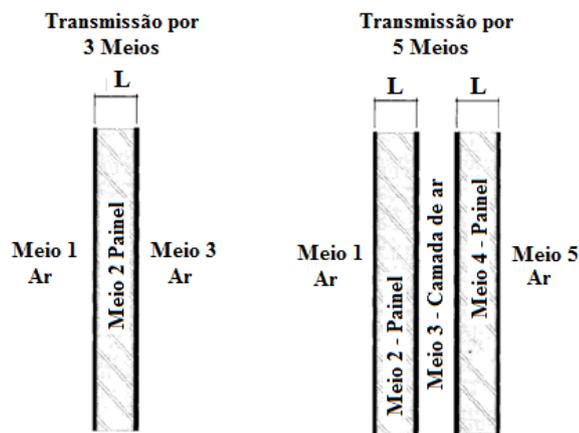


Fonte: Josse (1975).

A perda de transmissão nos modelos que têm menos contato entre os painéis (modelo 2) é maior, mostrando que o ar oferece maior resistência à passagem da onda sonora do que o meio sólido. O modelo 3 indica que a eficiência na perda de transmissão com camada de ar foi prejudicada, em decorrência dos conectores entre os painéis criados pela colmeia.

Em sistemas com separadores duplos, a incorporação de um espaço de ar de 15 a 200 mm fornece um aumento na TL de aproximadamente 6 dB acima da soma de cada um deles (GERGES, 1992). Para maior TL em elementos duplos, é recomendado usar espessuras diferentes, a fim de se evitar a excitação das frequências de ressonância dos elementos simultaneamente. Na Figura 21, ilustram-se os dois sistemas de transmissão.

Figura 21 - Transmissão sonora por 3 e 5 meios.



Fonte: Adaptado de Gerges (1992).

4.5 Conforto acústico

A acústica é a ciência que estuda a produção, transmissão e efeitos do som. O conforto acústico do ambiente construído é um dos aspectos mais importantes de qualquer projeto arquitetônico. Uma das formas de poluição ambiental que mais tem aumentado nos últimos anos é a poluição sonora, exigindo soluções quanto ao controle de seus efeitos sobre o ambiente de vida das pessoas. As alterações provocadas pela poluição química da água e do ar, por exemplo, podem ser facilmente identificadas, já os efeitos da poluição sonora não são observados imediatamente. Doenças degenerativas como a surdez e desequilíbrios psíquicos vão se implantando ao longo do tempo de exposição. Os níveis moderados de ruído são os mais traiçoeiros porque seus efeitos instalam-se aos poucos. Muitos sinais passam despercebidos devido à tolerância e aparente adaptação do ser humano e por esta razão, torna-se de difícil reversão (NORONHA; TRAVAGLIA FILHO; GARAVELLI, 2005). Os níveis sonoros em decibéis nos períodos diurnos e noturnos, segundo a NBR 10.151 (ABNT, 2003a), descritos na tabela 1.

Tabela 1 - Níveis de pressão sonora máximos permitidos para cada ambiente (dB).

Área	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Residencial urbana / hospitais/escolas	50	45
Residencial mista	55	50
Área mista comercial e administrativa	60	55
Área mista recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: ABNT (2003a).

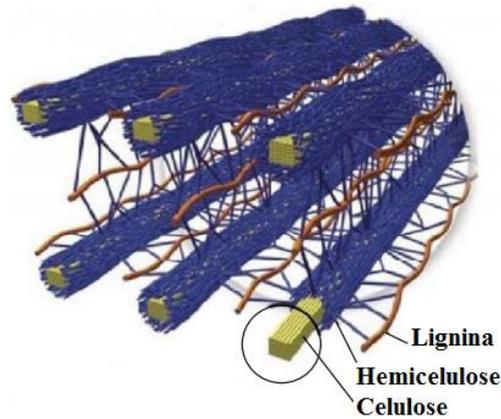
O som é definido como qualquer perturbação vibratória em um meio elástico, que, produza sensação auditiva (MERLUZZI, 1981). O ruído é um sinal acústico aperiódico, originado da superposição de vários movimentos de vibração com diferentes frequências que não apresentam relação entre si (FELDMAN; GRIMES, 1985). Enquanto o som é utilizado para descrever sensações prazerosas, o ruído é usado para descrever sons indesejáveis ou desagradáveis, o que traz um aspecto de subjetividade à sua definição. Ambientes sujeitos a níveis elevados de pressão sonora, acima de 85 dB podem causar perda de audição induzida por ruído (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 1999a). Quanto maior for o nível de pressão sonora, menor será o tempo permitido à sua exposição. Há duas formas de se tratar acusticamente um ambiente para a permanência saudável das pessoas: controlar o som no interior dos ambientes e isolar contra ruídos externos. Os elementos de controle são: a concepção arquitetônica, os materiais de revestimento, mobiliários e equipamentos que compõem o ambiente. Os painéis de madeira têm sido cada vez mais utilizados para revestir, dividir e compor os ambientes. Assim, se usados com critério podem promover a absorção sonora ou reflexões difusas, condicionando o campo sonoro existente, tornando-o saudável.

4.6 Material pesquisado

4.6.1 Fibras celulósicas

A biomassa celulósica é o material mais abundante em nosso planeta. É composto basicamente por celulose, hemiceluloses, lignina, e outros componentes em pequenas quantidades. O modelo dos principais componentes que constituem este material ligno celulósico está representado na Figura 22.

Figura 22 - Modelo da estrutura molecular dos principais constituintes do material.



Fonte: Mamtaz et al. (2016).

Nota: lignocelulósico (parede secundária).

As cadeias de celulose se mantêm compactadas, por meio de ligações de hidrogênio trazendo rigidez à planta. A lignina circundante envolve os componentes e age como barreira física contra o ataque de microorganismos e as hemiceluloses proporcionam a ligação entre os dois elementos anteriores formando assim a rede fibrosa. As outras substâncias extraíveis que não compõem a parede celular são, em sua maioria, solúveis em solventes neutros. As frações não extraíveis como cinzas e resíduos inorgânicos permanecem depois de se queimar o substrato a elevadas temperaturas, em proporção variável dependendo de fatores como espécie, idade, local de plantio, condições de crescimento entre outros (BIDLACK; MALONE; BENSON, 1992).

As fibras lignocelulósicas são caracterizadas por uma estrutura celular composta por regiões cristalinas (altamente ordenadas) e regiões amorfas (desordenadas) interligadas por lignina e hemiceluloses. A estrutura da fibra vegetal é formada por um canal central chamado lúmen responsável pelo transporte de água e nutrientes, e pela parede celular. A parede celular da fibra é composta por: lamela média, parede primária, parede secundária subdividida em três camadas (S1, S2 e S3), compostas por microfibrilas orientadas de acordo com cada camada. A parede primária, inicialmente depositada durante o crescimento de células, consiste em um arranjo desordenado de fibrilas colocadas em uma matriz de pectina, hemicelulose, lignina e proteína. As paredes secundárias consistem em celulose cristalina, microfibrilas organizadas em um arranjo em espiral onde a camada intermediária (S2) determina as propriedades mecânicas da fibra, de sustentação estrutural. Ela consiste em uma quantidade de microfibrilas, em um esquema helicoidal conformadas por longas cadeias de celulose.

A lamela média, que é a camada externa da célula, é composta predominantemente por pectina que atua como cimento entre fibras. O principal componente das fibras vegetais é a

celulose, que é um polissacarídeo de cadeia longa formada por unidades de glicose β -D que se unem através de ligações β (1 \rightarrow 4). Apesar da natureza higroscópica das moléculas de celulose, apenas regiões amorfas acomodam água. As forças envolvidas no controle de entrada da água nas membranas celulares são interações de van der Waals entre as cadeias poliméricas. As hemiceluloses estão presentes em todas as camadas da planta na parede celular, no entanto concentram-se nas camadas primária e secundária em associação com a celulose e lignina. As hemiceluloses não são cristalinas e atuam como plastificante estrutural, permeando as microfibrilas de celulose, impedindo que elas se toquem. Essa função das hemiceluloses, dá ao conjunto (hemicelulose/celulose) elasticidade, que reflete o comportamento visco-elástico da parede celular. Além disso, possuem funções de regulação do crescimento e desenvolvimento das plantas (ULLMANN, 2010). A lignina é um complexo molecular altamente reticulado com estrutura amorfa e atua como agente aglutinante entre as células de fibras individuais e as fibrilas que formam a parede celular. É basicamente composta por unidades de fenilpropano sob a forma de macromoléculas amorfas tridimensionais. É também responsável pela propriedade de rigidez da planta, agindo como uma estrutura resistente ao impacto e compressão (PEREIRA et al., 2015).

4.6.2 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma gramínea da família *Poaceae* de origem asiática, trazida para o Brasil pelos portugueses no século XVI. É composta principalmente por água e açúcares que se concentram nos colmos sendo a sacarose o carboidrato predominante. Os colmos possuem entrenós distintos e espessos, com alto teor de fibras. A cana possui vários tipos de tecidos. O córtex (casca) é composto de fibras muito lignificadas, caracterizado pela espessura da parede celular e rigidez das fibras. É responsável pela proteção contra efeitos mecânicos externos e sustentação da planta. No interior da planta está a medula, tecido parenquimatoso, não fibroso cuja função é armazenar o suco adocicado produzido pela planta. Dentro da medula, encontram-se as hastes fibrovasculares com vasos e fibras que atuam na condução dos alimentos ao longo da planta (PATURAU, 1989).

A cana de açúcar possui a terceira maior área plantada do Brasil, 10 milhões de hectares, ficando atrás apenas da soja e do milho; porém corresponde a maior produção agrícola do país com 716,8 milhões de toneladas (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2015). A cultura canieira no Brasil sofreu sua maior expansão quando se passou a incentivar a utilização do álcool como combustível. Entretanto, proporcional ao desempenho vertiginoso é o desafio ambiental enfrentado pelo

país nesse seguimento. A cana-de-açúcar é a cultura que mais gera resíduo no Brasil. Só no ano de 2009, os engenhos produziram 201 milhões de toneladas em torta de filtro e bagaço (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA, 2015).

4.6.3 Bagaço de cana-de-açúcar

Bagaço é o resíduo fibroso da cana-de-açúcar, após ser esmagado e extraído seu caldo. A quantidade produzida depende do teor de fibra da cana processada; apresenta, em média, 46% de fibra e 50% de umidade, que resulta em, aproximadamente, 280 quilos de bagaço por tonelada de cana processada. Pela proporção em que é produzido e, em razão da sua composição, o bagaço constitui-se em um dos mais importantes subprodutos para a indústria sucroalcooleira. Suas principais aplicações são: combustível para caldeira, produção de celulose e na alimentação de gado confinado (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2015). A composição química do bagaço de cana-de-açúcar e as características dimensionais da fibra estão apresentadas nas tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Composição química do bagaço de cana-de-açúcar.

Componente	Valor %
Celulose	55.75 ± 0.4
Lignina	20.5 ± 1.7
Extrativos solúveis em álcool – acetona	3.25 ± 4.3
Teor de cinzas	1.85 ± 3.7

Fonte: Hemmasi et al. (2011).

Tabela 3 - Características dimensionais da fibra do bagaço de cana-de-açúcar.

	Comprimento (mm)		Diâmetro da Célula (µm)		Espessura da parede (µm)		Largura Lume (µm)	
	Valor	CV	Valor	CV	Valor	CV	Valor	CV
Fibra	1,59	0,21	20,96	0,24	5,64	0,33	9,72	0,29

Fonte: Hemmasi et al. (2011).

Nota: CV: Coeficiente de variação.

O bagaço de cana também possui característica porosa. O maior diâmetro da fibra e a menor espessura de parede proporcionam maior quantidade de volumes vazios. Os absorvedores convencionais constituídos de lãs minerais possuem fibras com diâmetro variando de 2µm a 9µm; a fibra de bagaço de cana possui em média diâmetro de 20 µm e diâmetro do lume de 10,0 µm (SAMARIHA; KHAKIFIROOZ, 2011).

4.6.4 Estado da arte: fibras naturais para atenuação sonora

Os resíduos biológicos agroindustriais, são objetos de estudo como absorvedores acústicos. Wassilief (1996) observou que o som é mais refletido do que absorvido em painéis à base de madeira com densidades entre $0,65 \text{ g/cm}^3$ e $0,80 \text{ g/cm}^3$. Koizumi, Tsujiuchi e Adachi (2002), estudando absorção em painel de bambu, observaram que a redução de ruído aumentou com o aumento da frequência e da densidade. Yang, Kim e Kim (2003), trabalhando com painel constituído de partículas de palha de arroz e madeira, observaram coeficientes de absorção maiores na faixa de frequência de 500 Hz a 8KHz. Ekici, Kentli e Küçük (2012) e Ersoy e küçük (2009) misturaram fibras de folhas de chá com poliuretano e obtiveram amostras de 1 cm de espessura que apresentaram absorção sonora equivalente a seis camadas de tecido acústico. Zulkifli e Zulkarnain (2010), estudando a fibra de coco, obtiveram um coeficiente de absorção de 0,8 e misturada a aglutinante esse valor decresceu. Faustino et al. (2012), confeccionando painéis aglomerados de espigas de milho com densidade de $0,33 \text{ g/cm}^3$, observaram ganho de isolamento acústico de impacto de 30 dB em uma sala emissora de ruído. Yang e Li (2012) observaram boa capacidade de compactação e níveis de absorção sonora entre 0,50 e 0,10 em painéis de algodão, linho, rami, lã, juta e sisal. Comparando também a performance das fibras naturais de rami, juta e sisal com fibras sintéticas em painéis, observaram que a estrutura multiforme contendo cavidades de ar conectadas, obtiveram capacidade superior de redução de ruído em relação ao compósito de fibras sintéticas. Kalinasari et al. (2012) pesquisaram valores de *transmission loss* em painéis de bambu com diferentes densidades. Os resultados mostraram que os painéis de média densidade ($0,8 \text{ g/cm}^3$) obtiveram valores melhores do que os de baixa densidade, $0,5 \text{ g/cm}^3$ para a propriedade analisada. Xiang et al. (2013), trabalhando com painel de sumaúma, identificaram uma faixa de densidade ideal para o comportamento de redução de ruído do painel; acima dessa faixa, o coeficiente de redução de ruído decresceu.

Mamtaz et al. (2016) relatam que a absorção acústica de baixa frequência, em compósitos de fibra natural, pode ser melhorada, em decorrência de fatores como tamanho da fibra, densidade aparente, espessura da amostra, incorporação de elementos como grãos de borracha nos compósitos, etc. De acordo com Mamtaz et al. (2016), o maior diâmetro da fibra resultou no aumento do teor de fibras que, por conseguinte, propiciou maior absorção, devido à fricção viscosa das moléculas de ar com uma área de superfície maior. Ainda, segundo Mamtaz et al. (2016), em materiais compósitos fibrogranulares, o preenchimento dos poros pela componente granular forma pontes entre as fibras e contribui para o aumento da área superficial dentro do compósito. Em outro estudo sobre absorção sonora em materiais à base de madeira, Smardzewski et al. (1996), experimentaram 17 composições diferentes de painéis de madeira, variando tipo de superfície, miolo, espessura e constituição (aglomerados, compensados e mistos) com densidades diferentes. Smardzewski et al. (1996)

observaram que, para frequências entre 125 e 500 Hz, a alta capacidade de absorção sonora foi determinada pela baixa densidade da camada superficial e alta porosidade; os painéis com estrutura de favo de mel, contendo espaços de ar, absorveram melhor nas frequências entre 1000 e 2000 Hz; painéis com superfície irregulares foram mais favoráveis à absorção na faixa de frequência de 4000 Hz. Eles também observaram a variação da densidade em função da frequência, na absorção sonora. Constataram que a absorção é maior em baixas frequências para densidades maiores.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Produção dos painéis

5.1.1 Tratamento do bagaço de cana e geração das partículas

Foram utilizados 40 kg de bagaço de cana-de-açúcar provenientes de uma fazenda do interior de Minas Gerais. O bagaço passou por três lavagens com intervalo de 2 dias entre elas, para retirada do excesso de açúcar. Depois de secar ao ar livre por 3 dias, foi levado para a estufa a 80°C por três dias até estar seco, como mostra a Figura 23.

Figura 23 - A) bagaço *in natura*; B) lavagem; C) secagem ao ar livre; D e E) secagem em estufa.



Fonte: Da Autora (2017).

O bagaço foi processado em dois tipos de moinho de martelo, e depois em moinho de disco, a fim de se obter partículas bem finas. Posteriormente, as partículas foram peneiradas em peneiras de 5/16 *mesh* (8 mm), 40 *mesh* (0,42 mm) e, por fim, 60 *mesh* (0,25 mm) de malha. Foi destinado ao miolo, o material retido na peneira de 40 *mesh*; e às faces, o material retido na peneira de 60 *mesh*. As partículas foram colocadas em bandejas na estufa à temperatura de 80°C por 24 horas até atingir umidade próxima de 4%. Esses procedimentos estão mostrados na Figura 24.

Figura 24 - A) moinho de martelo; B) partículas a peneirar; C) peneira de 8mm; D) peneira de 40mesh; E) moinho de disco; F) peneira de 60 mesh; G) pó; H) partículas na estufa.



Fonte: Da Autora (2017).

5.1.2 Confeção dos painéis

Os painéis foram produzidos no laboratório da UEPAM (Unidade de estudos de painéis de madeira) da Universidade Federal de Lavras. Para a confecção dos painéis, as partículas foram pesadas e ensacadas para serem utilizadas conforme os tratamentos estabelecidos. Depois de misturadas ao adesivo ureia-formaldeído em uma encoladeira, foram dispostas em um colchão com partículas na ordem: face, miolo e face. Determinada a espessura de 15 mm, foram comprimidas em uma prensa manual para assemblagem, processo no qual ocorre a absorção e umedecimento do adesivo pelas partículas, antes que sejam solidificadas sob o efeito da temperatura. Por fim, foram levadas à prensa quente com temperatura e pressão de 160 °C e 40 kgf respectivamente, sendo fixado o tempo de 8 minutos de prensagem. Depois de retirados e frios, os painéis foram cortados nas dimensões de 550 mm x 380 mm e levados para a câmara de climatização à temperatura de 20°C +/- 2 e umidade de 65% +/- 3. Esse processo pode ser visto nas Figuras 25, 26 e 27.

Figura 25 - A) pesagem das partículas; B) preparação do adesivo; c) mistura partícula/ adesivo na encoladeira; D) formação do colchão de partículas; E) pré-prensagem manual.



Fonte: Da Autora (2017).

Figura 26 - A) bolo de partículas; B) limitação da espessura e cobertura; C) prensagem a quente; D) parâmetros de prensagem.



Fonte: Da Autora (2017).

Figura 27 - A) painel saído da prensa; B) painéis a serem cortados; C e D) painéis prontos na câmara de climatização.



Fonte: Da Autora (2017).

Foram confeccionados 12 painéis aglomerados com 15 mm de espessura, sendo 4 com densidade de $0,55\text{g/cm}^3$ e 8 com densidade de $0,35\text{g/cm}^3$. Desses 8, 4 painéis receberam nanopartículas em suas faces.

5.1.3 Produção e aplicação de nano partículas de bagaço de cana

As nanopartículas foram produzidas a partir da fibra branqueada do bagaço de cana para incorporação em quatro painéis com densidade de 35g/cm^3 . Após a moagem e peneiramento, as partículas receberam tratamento de deslignificação e branqueamento. Para a deslignificação foram utilizados 1,2 kg de partículas e a elas adicionou-se soda cáustica (NaOH) a 25% e sulfeto de sódio (Na₂S) a 14%; a essa solução foram acrescentados 4 L de H₂O desmineralizada. A mistura foi aquecida durante 30 minutos a 150°C e 10 kgf em um biodigestor. Depois, esse material foi lavado e obteve-se uma polpa marrom escura. O branqueamento foi obtido adicionando 5% de NaOH em relação à massa de fibras, ajustando o pH para 10,3 litros de água e 15% de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) a 30% (v/v). A solução foi aquecida por 2 horas. A seguir, o material foi lavado e esse procedimento repetido por 3 vezes até que se obteve uma polpa clara como mostra a Figura 28.

Figura 28 - A) deslignificação; B) biodigestor; C) cozimento; D) polpa escura úmida; E) polpa escura seca; F) solução para o branqueamento; G) aquecimento; H) polpa clareada.



Fonte: Da Autora (2017).

A polpa branqueada foi seca em estufa a 50°C por 2 dias e mantida resfriada até a redução das nano partículas, conforme mostra a Figura 29.

Figura 29 - Polpa branqueada (A e B).



Fonte: Da Autora (2017).

As nanopartículas foram misturadas em uma solução de água desmineralizada, na concentração de 2,58 %. A solução passou então pelo processo de desfibrilação em um moinho *grinder* por 70 vezes, como mostrado na Figura 30. Depois, foi guardada sob refrigeração até ser utilizada para a aspersão nos painéis.

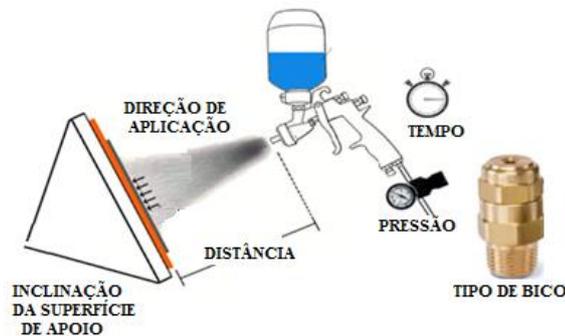
Figura 30 - A) solução com polpa de bagaço de cana; B e C) processo de desfibrilação.



Fonte: Da Autora (2017).

A concentração da suspensão de nano partículas foi ajustada para 1,4%, conforme metodologia de Mirmehdi (2016). A pulverização da suspensão de base aquosa seguiu os seguintes parâmetros: direção de aplicação normal à superfície, distância de pulverização de 15 cm, tempo de exposição de 50s, pressão de pulverização de 5 bar. Durante os 50 s, o aplicador percorreu a superfície horizontalmente, de cima para baixo, de acordo com o esquema da Figura 31.

Figura 31 - Esquema de aspersão das nanopartículas no painel.



Fonte: Da Autora (2017).

Após o ajuste da concentração da solução, seguiu-se a etapa de pulverização por aspersão. A solução foi colocada em um reservatório ligado ao aspersor que, durante 50 s, percorreu toda a superfície do painel. Em seguida, os painéis foram levados a uma estufa, submetidos à temperatura de 50°C por um dia. Foram confeccionadas amostras dos painéis pulverizados para utilização em microscópio eletrônico de varredura. Posteriormente, o material foi levado à câmara de climatização até ser utilizado para os testes. Na Figura 32, ilustra-se esse processo.

Figura 32 - A) ajuste da concentração; B) enchimento do reservatório; C e D) aspersão; E) amostras dos painéis por tratamento pulverizadas; F) estufa para secagem.



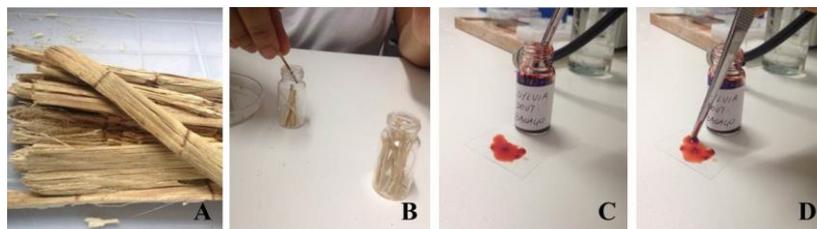
Fonte: Da Autora (2017).

5.2 Caracterização da fibra de bagaço de cana-de-açúcar

A caracterização anatômica foi realizada no Laboratório de anatomia da madeira da Universidade Federal de Lavras. Foi feita a maceração pelo método de *Franklin*

(FRANKLIN, 1945). Pequenos fragmentos longitudinais da fibra do bagaço de cana foram retirados e colocados em um vidro contendo uma solução de ácido acético e peróxido de hidrogênio na proporção de 1:1. O vidro foi tampado e colocado em estufa a 60°C por 24 horas. Depois foi lavado em água corrente e colocado em outro vidro contendo água destilada e safranina. Em seguida, pequenas porções do material foram colocadas em lâminas contendo glicerina para serem analisadas em microscópio binocular óptico de luz. Na figura 33, exemplifica-se esse processo.

Figura 33 - A) bagaço de cana; B) maceração das fibras; C e D) montagem das lâminas.



Fonte: Da Autora (2017).

5.3 Micrografias eletrônicas de varredura

Foram obtidas as imagens de todos os tipos de painel relacionados na pesquisa, a partir das micrografias em microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de microscopia eletrônica e análise ultraestrutural do Departamento de fitopatologia da Universidade Federal de Lavras.

Foram realizadas duas montagens contendo amostras dos painéis por tratamento. O esquema de montagem dos *Stubs* pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 - Montagem dos *stubs* para análise em MEV.



Fonte: Da Autora (2017).

5.4 Câmara reverberante

Para a realização dos testes, foram idealizadas duas câmaras reverberantes de vidro acopladas, com escala reduzida e parâmetros de acordo com as normas ISO 140 e ISO 354. Essas normas recomendam dimensões, de tal forma que o comprimento da maior linha reta no

interior da câmara seja menor que $1,9 \times V^{1/3}$ (sendo V o volume da câmara). As dimensões adotadas para cada câmara reverberante estão contidas na tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões da câmara reverberante.

DIMENSÕES DA CÂMARA REVERBERANTE			
Dimensões (m)		Escala Reduzida 1: 8,6	Verdadeira grandeza
Lx	Comprimento	0,55	4,78
Ly	Largura	0,46	4,00
Lz	Altura	0,38	3,30
Área Total (m ²)		0,253	19,20
Volume (m ³)		0,096	63,09

Fonte: Da Autora (2017).

A relação dimensão x volume (ISO, 1999b) está representada pela expressão (5):

$$L_x < 1,9 \cdot V^{1/3} \quad (5)$$

$$0,55 < 1,9 \cdot \sqrt[3]{0,096}$$

$$0,55 < 0,87 \rightarrow \text{Satisfeita a condição.}$$

A norma ISO 3741 (ISO, 2010), estabelece que as dimensões (Ly/Lx e Lz/Lx) não devem igualar de um inteiro. Esses valores estão especificados na tabela 5, e satisfazem a condição normativa.

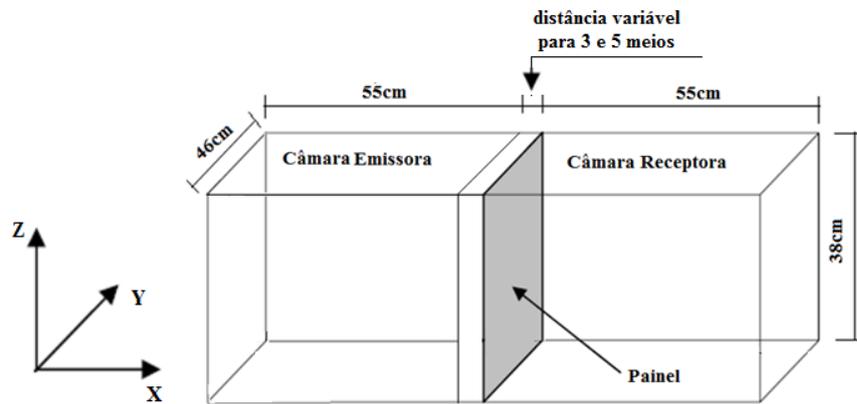
Tabela 5 - Relação entre as dimensões da câmara.

Relação entre as dimensões da câmara reverberante		
Ly/Lx	0,46 / 0,55	0,84
Lz/Lx	0,38 / 0,55	0,69

Fonte: Da Autora (2017).

De acordo com os requisitos estabelecidos pelas normas mencionadas e, devido à limitação das dimensões da prensa para confecção dos painéis, a maior dimensão da câmara foi de 0,55 m e a escala de redução adotada foi de 1: 8,6, Figura 35.

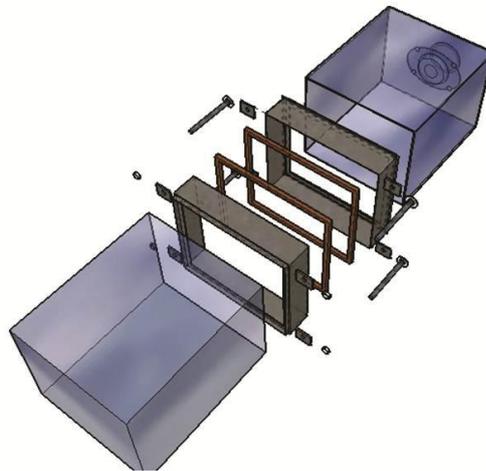
Figura 35 - Representação gráfica das câmaras reverberantes.



Fonte: Da Autora (2017).

As câmaras foram constituídas de vidro temperado com 6 mm de espessura, no formato de paralelepípedo sem a aresta frontal por onde receberam uma estrutura de caixilhos intermediários, em metal para conexão entre elas e colocação dos painéis a serem testados. O projeto do conjunto pode ser visto em 3D na Figura 36.

Figura 36 - Modelo 3D da estrutura.



Fonte: Da Autora (2017).

Os caixilhos foram confeccionados para receberem os módulos, de tal forma que mantivessem o tamanho original das câmaras, porém o afastamento entre elas fosse variável, constituído por um sistema de camadas em função da espessura do painel simples, duplo ou ainda pelo somatório das espessuras dos painéis e a camada de ar entre eles. Figura 37.

Figura 37 - Abertura de acoplamento das câmaras (A); fechamento das câmaras sem painel (B); detalhe de montagem multicamadas entre as câmaras (C).



Fonte: Da Autora (2017).

As câmaras foram conectadas e fechadas por um sistema de hastes e parafusos soldados nos caixilhos. Uma vez fechadas as câmaras, o travamento foi feito exteriormente. A fonte sonora foi fixada em uma base de madeira que, por sua vez, foi instalada na parte posterior da câmara emissora. Figura 38.

Figura 38 - Fixação do alto-falante em base de madeira na câmara emissora.



Fonte: Da Autora (2017).

Os caixilhos receberam revestimento de *neopreni* (tipo de borracha expandida sob pressão e temperatura) nas quatro bordas de acoplamento, tanto para isolamento entre o vidro e o metal como para delimitação da área de exposição dos painéis, Figura 39.

Figura 39 - Detalhe da proteção e delimitação das bordas das câmaras.



Fonte: Da Autora (2017).

As câmaras foram providas de orifícios para passagem dos fios. Esses orifícios foram tampados com silicone, a fim de não permitirem a saída de energia sonora por eles. A transmissão sonora ocorreu através de três meios (Câmara emissora / amostra / câmara receptora) com painel simples e duplo e através de cinco meios (câmara emissora / amostra / camada de ar / amostra / câmara receptora) nesta montagem, apenas com painel simples, Figura 40.

Figura 40 - (A) montagem com painel simples, 3 meios; (B) caixilho vazado separador da camada de ar, 5 meios; (C) e (D) montagem dos cinco meios.



Fonte: Da Autora (2017).

Os painéis foram posicionados sobre borrachas amortecedoras de vibração, Figura 41.

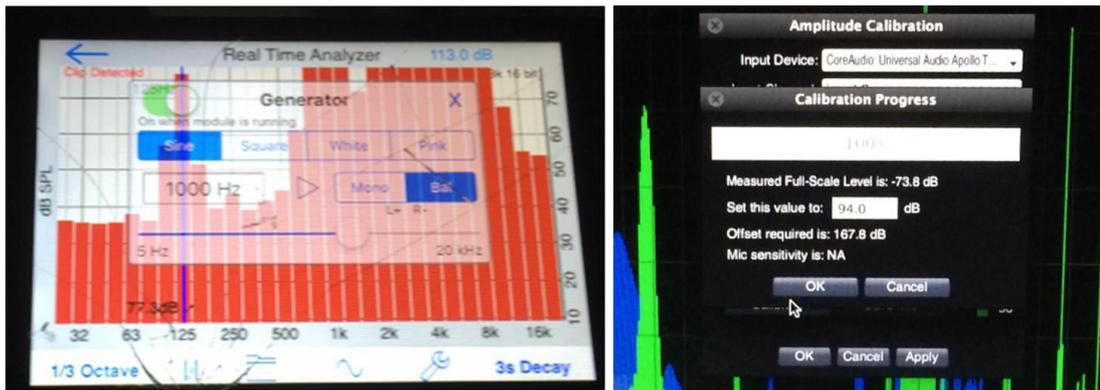
Figura 41 - Apoio de borrachas para os painéis.



Fonte: Da Autora (2017).

Os microfones passaram por um sistema de calibração com o ruído branco, antes de iniciar as medições, Figura 42.

Figura 42 - Fonte geradora do sinal – Calibragem dos microfones.

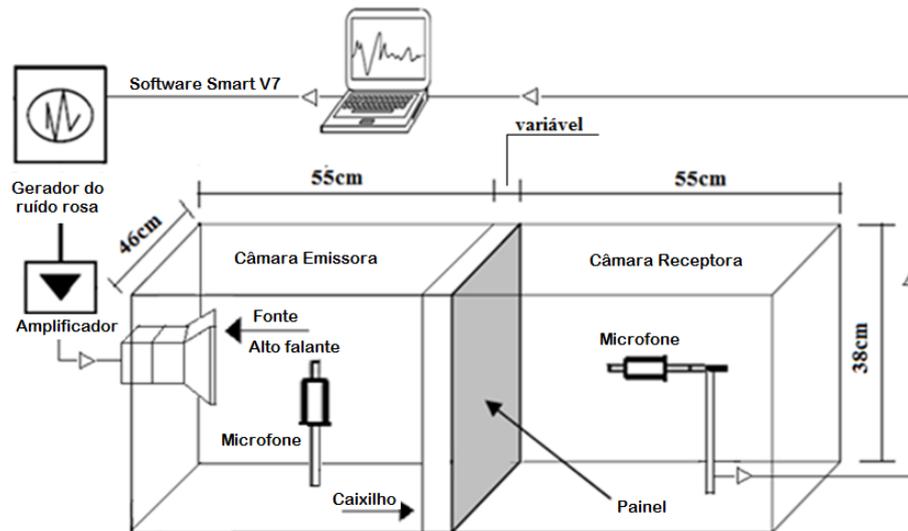


Fonte: Da Autora (2017).

5.5 Montagem do experimento

A fonte sonora foi posicionada no fundo da câmara emissora, à meia altura. O software *Smaart 7*® emitiu um ruído rosa, que foi amplificado e passou para o alto-falante. O nível de pressão sonora foi captado por um microfone colocado na câmara emissora e outro na câmara receptora. Esse sinal foi enviado para o computador e analisado pelo *Smaart 7*®, conforme mostra a Figura 43.

Figura 43 - Esquema de montagem do experimento.



Fonte: Da Autora (2017).

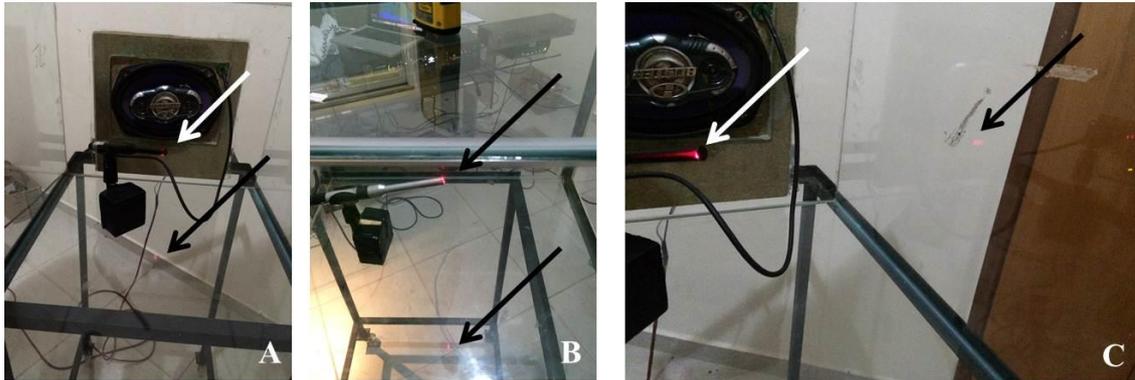
O software *Smaart 7*® gerou gráficos de NPS (nível de Pressão Sonora, em dB) por frequência (Hz), e dados que foram posteriormente tabulados.

Os microfones em ambas as câmaras foram posicionados e fixados no centro de cada câmara, respeitando os limites mínimos e máximos de afastamento das arestas, para minimizar possíveis ondas estacionárias próximas a elas. Esses limites mínimos foram baseados na metodologia de Toutonge (2006), alterados para a escala da câmara, conforme segue:

- a) 4,67 cm entre as posições dos microfones;
- b) 4,67 cm entre qualquer posição do microfone e os contornos da câmara;
- c) 6,67 cm entre qualquer posição de microfone e a fonte sonora;
- d) 6,67 entre qualquer posição de microfone e a fonte sonora.

O posicionamento dos microfones foi de: 27,5 cm em relação aos planos horizontais; 19 cm em relação aos planos verticais e 23 cm em relação aos planos laterais, conforme Figura 44.

Figura 44 - Posicionamento dos microfones utilizando um feixe de *laser* (A) em relação aos planos horizontal; (B) vertical; (C) em relação ao plano lateral da câmara.



Fonte: Da Autora (2017).

O sistema de câmaras foi apoiado em estruturas de ferro com rodízios giratórios de silicone para facilitar a movimentação do conjunto, Figura 45.

Figura 45 - (A) Apoio deslizante de ferro; (B) Rodízios de silicone; (C) Conjunto montado.



Fonte: Da Autora (2017).

A montagem final do experimento, pode ser vista na Figura 46.

Figura 46 - Montagem final do experimento.



Fonte: Da Autora (2017).

De acordo com a norma ISO 140 (ISO, 1999a), foram realizadas as medições com um microfone em cada câmara, emissora e receptora. Os resultados foram aferidos, tabulados e as médias obtidas. A área de exposição sonora calculada e as medições de ruído de fundo e tempo de reverberação das câmaras foram realizadas sem as divisórias de painel. Foram realizadas quatro medições por tratamento, com troca dos painéis. A propriedade pesquisada, *Transmission Loss* (TL) foi obtida pela diferença entre os valores aferidos pelo microfone da câmara emissora e os valores aferidos pelo microfone da câmara receptora após a colocação dos painéis.

5.6 Tempo de reverberação da câmara receptora

O tempo de reverberação (TR) é aquele necessário para que o nível de pressão sonora decaia em 60dB, depois que a fonte interrompe a emissão. De acordo com a norma NBR 12179/1992 (ABNT, 1992) ele é calculado pela fórmula de Sabine (7):

$$TR = \frac{0,161 V}{\sum S\alpha} \quad (7)$$

Onde:

TR = tempo de reverberação (s)

V = volume da câmara (m³)

S = área das superfícies (m²)

α = coeficiente de absorção do material da câmara

Como o coeficiente de absorção do material (vidro) altera em função da frequência, foram calculados os tempos de reverberação da câmara receptora para as faixas de bandas centrais de frequência até 4000 Hz, último valor do coeficiente de absorção do vidro fornecido pela norma. Na tabela 6, apresentam-se esses valores calculados.

Tabela 6 - Tempo de reverberação da câmara receptora.

Frequência (Hz)	Coefficiente absorção vidro (α)	Tempo de Reverberação (TR)
125	0,18	0,0772
250	0,06	0,2310
500	0,04	0,3465
1000	0,03	0,4627
2000	0,03	0,4627
4000	0,02	0,6930

Fonte: Da Autora (2017).

5.7 Determinação da propriedade *Transmission Loss*

Os valores de *transmission loss* foram obtidos, a partir da diferença entre o ruído rosa padrão, captado pelo microfone da câmara emissora e o ruído rosa captado pelo microfone da câmara receptora, logo após o posicionamento dos painéis de acordo com os 18 tratamentos, conforme descritos no item 5.10.1. Os valores foram inicialmente tabulados, as médias entre as repetições calculadas e obtidas as diferenças entre os ruídos dos dois microfones. Em seguida, foram gerados os gráficos de *Transmission loss* (dB) x Frequência (Hz).

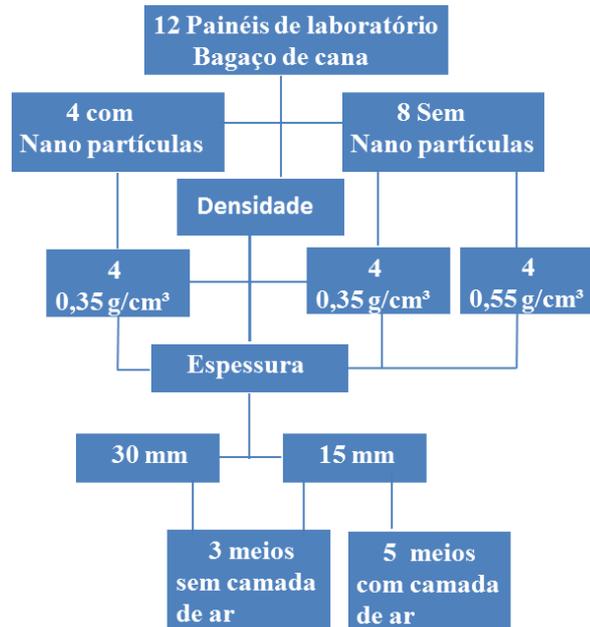
5.8 Instrumentação

Para a montagem do experimento foram utilizados: um microfone capacitivo da marca Briel & Kjaer dbx 4135 de ¼ de polegada, diâmetro de 7mm, faixas de resposta de frequência plana em campo livre; outro microfone da marca Beringer ECM 8.000, resposta de frequência linear de 15 Hz a 20 kHz, padrão polar omnidirecional, profissional; conversor com interface de áudio da marca Universal áudio Apollo 8; equalizador LL; Amplificador de potência Datrel, modelo Hdsd 100; alto-falante *Hbuster* 6x9, 120 wats RMS, modelo AB 6946; Computador Macbook Pro e o software *Smaart 7*®, Rational Acoustics LLC, versão 7.4.

5.9 Plano experimental

O plano experimental constituiu de duas etapas. A primeira se referiu aos doze painéis produzidos em laboratório, sendo quatro com densidade de 55g/cm³ e oito com densidade de 0,35g/cm³, dos quais quatro receberam revestimento de nanopartículas em suas faces. Todos os painéis foram testados quanto à espessura, de 15 mm (simples) e de 30 mm (duplos). Os painéis com espessura de 15 mm foram testados em duas configurações, três meios (sem camada de ar) e 5 meios (com cama de 15 mm de ar entre eles), porém os painéis com espessura dupla foram testados apenas com a configuração de três meios, sem camada de ar intermediária. Na Figura 47, representa-se essa etapa.

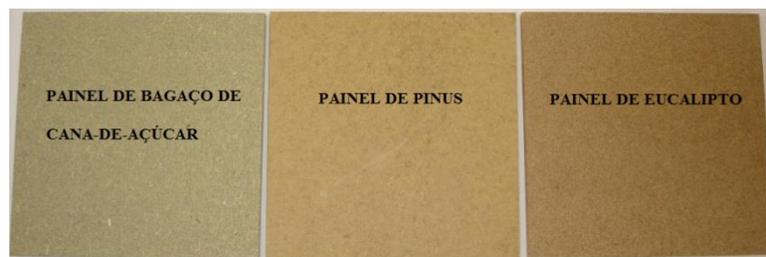
Figura 47 - Plano experimental – Painéis laboratoriais.



Fonte: Da Autora (2017).

Na segunda etapa, se referiu aos painéis produzidos industrialmente. Foram adquiridos 12 painéis aglomerados industriais, sendo quatro de bagaço de cana provenientes da China, quatro de pinus e quatro de eucalipto provenientes de fornecedores locais, conforme Figura 48.

Figura 48 - Painéis utilizados na pesquisa.



Fonte: Da Autora (2017).

Os valores de densidade foram aferidos e constam da tabela 7.

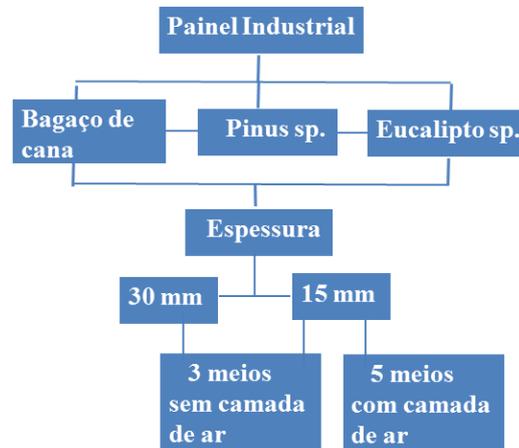
Tabela 7 - Densidade aparente dos painéis industriais.

Propriedade analisada (valores médios)	Espécies dos painéis		
	Bagaço de cana	Pinus	Eucalipto
Densidade aparente (g/cm ³)	0,543	0,645	0,636

Fonte: Carvalho et al. (2013).

Os painéis industriais foram testados, à semelhança dos laboratoriais, em relação à espessura e ao número de meios, com e sem camada de ar, conforme Figura 49.

Figura 49 - Plano experimental – Painéis industriais.



Fonte: Da Autora (2017).

5.10 Tratamentos

Foram propostos 18 tratamentos, de acordo com as variáveis analisadas: tipo de painel (procedência / densidade / incorporação de nano partículas e espécie), testadas em relação aos parâmetros: espessura (15 mm e 30 mm) e meios (3 e 5). Os tratamentos foram identificados, nominados e dispostos conforme tabela 8.

Tabela 8 – Tratamentos.

EFEITOS		TIPOS DE PAINEL					
ESPESSURA	MEIOS	Cana	Cana	Cana	Cana	Pinus	Eucalipto
		Laboratório 0,35 g/cm ³ com nano	Laboratório 0,35 g/cm ³ sem nano	Laboratório 0,55 g/cm ³	Industrial 0,54 g/cm ³	Industrial 0,65 g/cm ³	Industrial 0,64 g/cm ³
15 mm	3	T1	T4	T7	T10	T13	T16
15 mm	5	T2	T5	T8	T11	T14	T17
30 mm	3	T3	T6	T9	T12	T15	T18

Fonte: Da Autora (2017).

5.10.1 Descrição dos tratamentos

T1 – Painel de bagaço de cana-de-açúcar, fabricado em laboratório, com densidade de 0,35 g/cm³ e espessura de 15 mm, incorporado com nanopartículas de bagaço de cana em suas faces e testado sem camada de ar intermediária (3 meios: ar / painel / ar).

T2- Painéis de bagaço de cana-de-açúcar, fabricados em laboratório, com densidade de 0,35 g/cm³ e espessura de 15 mm, incorporados com nanopartículas de bagaço de cana em

suas faces e testados com camada de ar entre eles com distância de 15mm (5 meios: ar / painel / ar/ painel / ar).

T3- Painel de bagaço de cana-de-açúcar, fabricado em laboratório, com densidade de $0,35 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 30 mm, incorporado com nanopartículas de bagaço de cana em suas faces e testado sem camada de ar.

T4- Painel de bagaço de cana-de-açúcar, fabricado em laboratório, com densidade de $0,35 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, sem nanopartículas e testado sem camada de ar.

T5- Painéis de bagaço de cana-de-açúcar, fabricados em laboratório, com densidade de $0,35 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, sem nanopartículas e testados com camada de ar entre eles com distância de 15 mm.

T6- Painel de bagaço de cana-de-açúcar, fabricado em laboratório, com densidade de $0,35 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 30 mm, sem nanopartículas e testado sem camada de ar.

T7- Painel de bagaço de cana-de-açúcar, fabricado em laboratório, com densidade de $0,55 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, sem nanopartículas e testado sem camada de ar.

T8- Painéis de bagaço de cana-de-açúcar, fabricados em laboratório, com densidade de $0,55 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, incorporados com nanopartículas em suas faces e testados com camada de ar entre eles com distância de 15 mm.

T9- Painel de bagaço de cana-de-açúcar, fabricado em laboratório, com densidade de $0,55 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 30 mm, sem nanopartículas e testado sem camada de ar.

T10- Painel industrial de bagaço de cana-de-açúcar, proveniente da China, com densidade de $0,54 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, sem nanopartículas e testado sem camada de ar.

T11- Painéis industriais de bagaço de cana-de-açúcar, provenientes da China, com densidade de $0,54 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, sem nanopartículas e testados com camada de ar entre eles com distância de 15mm.

T12- Painel industrial de bagaço de cana-de-açúcar, proveniente da China, com densidade de $0,54 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 30 mm, sem nanopartículas e testado sem camada de ar.

T13- Painel industrial de Pinus, proveniente de fornecedor nacional, com densidade de $0,65 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, sem nanopartículas e testado sem camada de ar.

T14- Painéis industriais de Pinus, provenientes de fornecedor nacional, com densidade de $0,65 \text{ g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, sem nanopartículas e testados com camada de ar entre eles com distância de 15 mm.

T15- Paineis industriais de Pinus, provenientes de fornecedor nacional, com densidade de $0,65\text{g/cm}^3$ e espessura de 30 mm, sem nanopartículas e testados sem camada de ar.

T16- Paineis industriais de Eucalipto, provenientes de fornecedor nacional, com densidade de $0,64\text{g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, sem nanopartículas e testados sem camada de ar.

T17- Paineis industriais de Eucalipto, provenientes de fornecedor nacional, com densidade de $0,64\text{g/cm}^3$ e espessura de 15 mm, sem nanopartículas e testados com camada de ar entre eles com distância de 15 mm.

T18- Paineis industriais de Eucalipto, provenientes de fornecedor nacional, com densidade de $0,64\text{g/cm}^3$ e espessura de 30 mm, sem nanopartículas e testados sem camada de ar.

6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Delineamentos inteiramente ao acaso, dispostos em esquema fatorial sendo TL (*transmission loss*) a variável de interesse. Para as análises significativas, foram feitos os testes de média Scott-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Dimensões da fibra de bagaço de cana

Os valores encontrados para a fibra do bagaço de cana-de-açúcar, utilizados na pesquisa, foram próximos àqueles relatados por Hemmasi et al. (2011), e estão dispostos na tabela 9. Hemmasi et al. (2011) em seu estudo sobre a composição química e morfológica da fibra do bagaço de cana-de-açúcar, encontrou os valores de 1,59 mm (comprimento da fibra), 20,96 μ (diâmetro da fibra), 5,64 μ (espessura da parede) e 9,72 μ (largura do lume).

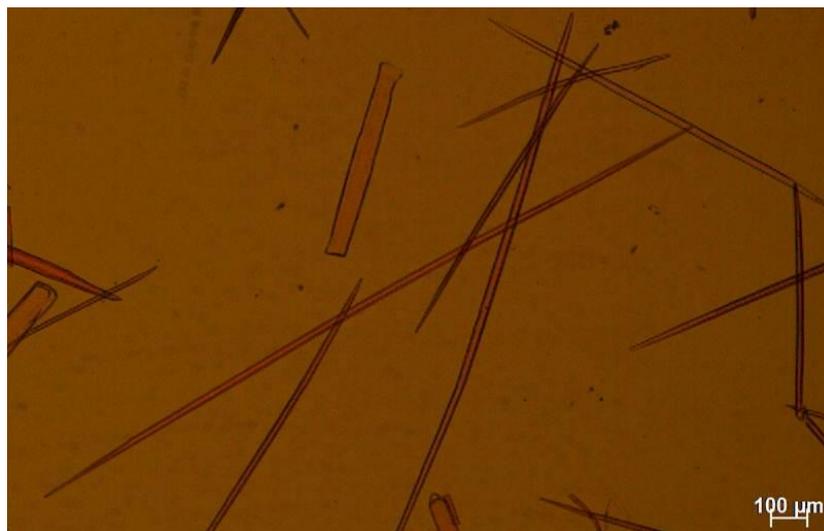
Tabela 9 - Dimensões da fibra de bagaço de cana.

	Comprimento fibra (mm)	Diâmetro da fibra (μm)	Espessura da parede (μm)	Largura Lume (μm)
	Valor	Valor	Valor	Valor
Máximo	2,67	30,75	7,84	15,06
Mínimo	0,49	13,68	3,57	6,16
Média	1,64	21,9	6,01	9,89
Nº dados	51	19	19	19
DP	0,53	3,93	1,25	2,65
CV	32,64	17,9	20,8	26,8

Fonte: Da Autora (2017).

O alto coeficiente de variação (CV) revelou que as fibras apresentaram grandes diferenças dimensionais, como pode ser observado na Figura 50.

Figura 50 - Imagem de microscópio óptico das fibras de bagaço dispersas.

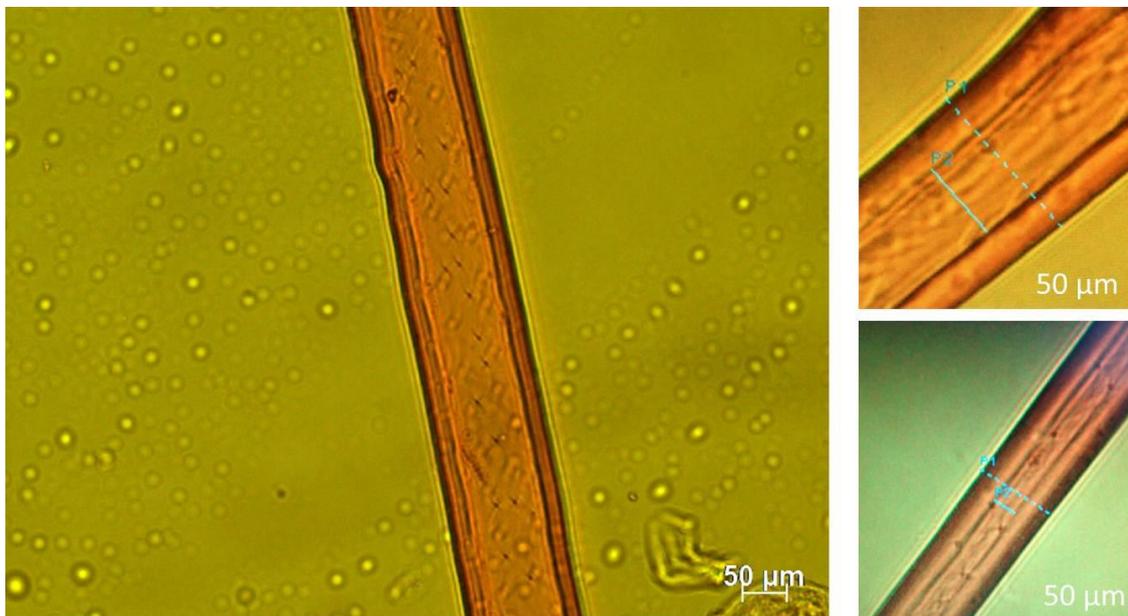


Fonte: Da Autora (2017).

As características da fibra e relações dimensionais morfológicas como espessura da parede e diâmetro da fibra (índice de Runkel), comprimento e largura da fibra (índice de

enfeltramento) são importantes para estabelecer a qualidade dos materiais quanto a aspectos como flexibilidade, resistência mecânica e resistência à passagem do ar, entre outros. De acordo com Agnihotri, Dutt e Tyagi (2014), em seu estudo sobre caracterização do bagaço de cana, as fibras do bagaço possuem paredes finas e longas dando origem a uma alta razão Runkel, do que decorre flexibilidade e capacidade de entrelaçamento. Quanto maiores forem essas características, maior facilidade de penetração do ar, ou seja, menos resistência oferecerá à entrada do ar e maior resistência à saída dele, em razão do entrelaçamento das fibras. As imagens da Figura 51 mostram algumas medições do diâmetro da fibra e espessura da parede.

Figura 51 - Imagens da largura da fibra.



Fonte: Da Autora (2017).

7.2 Delineamento experimental

A escolha dos atributos “diferentes densidades, presença e ausência de nanopartículas e diferentes espécies” para os tratamentos, foi considerada adequada por apresentarem compatibilidade entre os resultados estatísticos e experimentais atestados pelos gráficos e testes de média. Os resultados obtidos identificaram aspectos positivos em sua maioria, mas também negativos de acordo com os parâmetros de incremento, espessura e camada de ar nas diferentes faixas de frequência.

O delineamento experimental visou a obter novos parâmetros de comportamento dos painéis de fibra natural em face à performance acústica de perda de transmissão sonora em ambientes contíguos, separados por divisória. Diante disso, a metodologia de ensaio e

construção das minicâmaras reverberantes, tendo como aspecto inovador serem construídas em vidro temperado, atendeu às condições de teste especificadas pelas normas mencionadas anteriormente no item 5.4. Corrobora esse fato a correspondência entre os resultados empíricos obtidos na pesquisa e os relatados pela literatura no que se refere à faixa de valores próximos obtidos.

7.3 Análise geral: variável TL em função dos efeitos espessura e meios

Para discussão da influência dos dois tipos de efeito na perda da transmissão sonora, foram analisados os tratamentos em linha, sendo: a linha 1 considerada como testemunha, com espessura de 15 mm e 3 meios; a linha 2 sob o efeito da camada de ar entre os painéis, com 5 meios e 15 mm de espessura e a linha 3 sob o efeito da dupla espessura, com 30 mm e 3 meios. Para melhor visualização, a discussão foi elaborada por bandas de frequência baixa, média e alta. Na tabela 10, apresentam-se os tratamentos por linhas.

Tabela 10 - Análise dos tratamentos por linha.

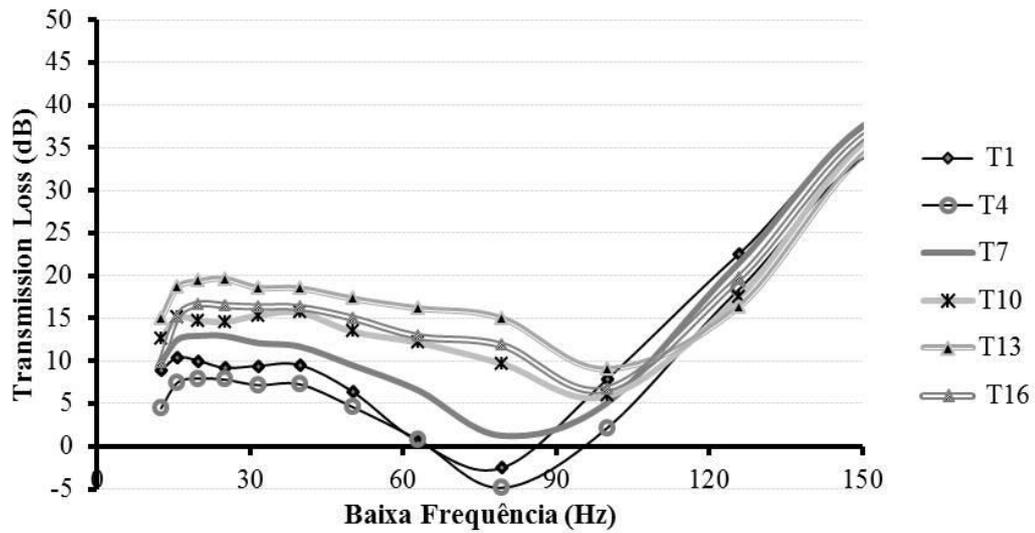
LINHA	EFEITO		TIPOS DE PAINEL					
	ESPESSURA	MEIO	Cana Laboratório 0,35 g/cm ³ com nano	Cana Laboratório 0,35 g/cm ³ sem nano	Cana Laboratório 0,55 g/cm ³	Cana Industrial 0,54 g/cm ³	Pinus Industrial 0,65 g/cm ³	Eucalipto Industrial 0,64 g/cm ³
1			15 mm	3	T1	T4	T7	T10
2	15 mm	5	T2	T5	T8	T11	T14	T17
3	30 mm	3	T3	T6	T9	T12	T15	T18

Fonte: Da Autora (2017).

7.3.1 Comparação entre os tratamentos na baixa frequência

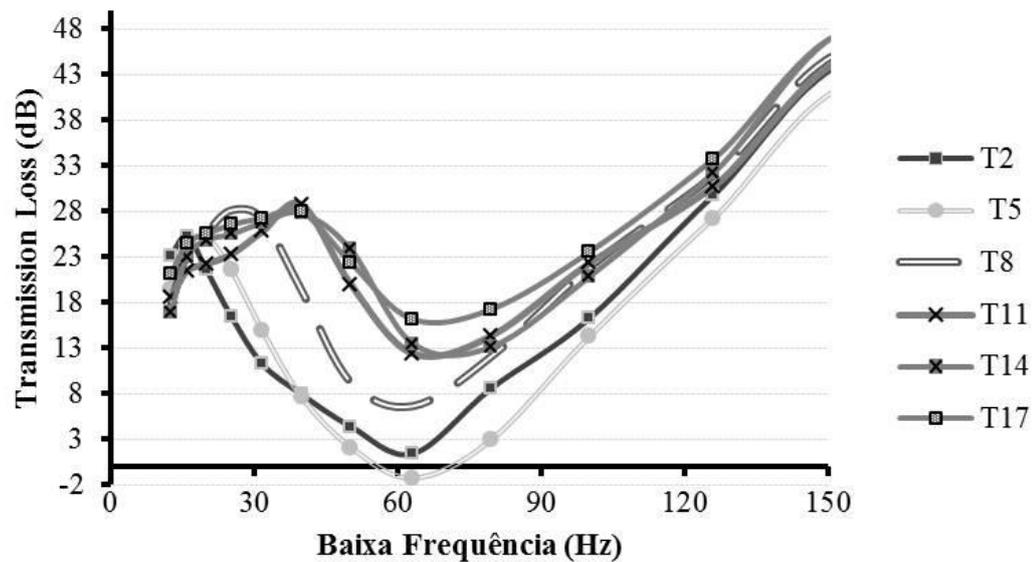
Na baixa frequência, intervalo de 0 a 150 Hz, os painéis industriais apresentaram os melhores resultados tanto para os tratamentos testemunha como para os tratamentos com camada de ar, Figuras 52 e 53.

Figura 52 - TL baixa frequência - Linha 1 – 0 a 150 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Figura 53 - TL baixa frequência - Linha 2 – 0 a 150 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Com a presença da camada de ar, houve melhora quanto aos valores de TL, na ordem de 10 dB entre 30 e 60 Hz e em 150 Hz, atingindo nesse ponto 48 dB. Essa melhora foi verificada também para as frequências de ressonância dos painéis laboratoriais de baixa densidade (T1 e T4), que sem camada de ar apresentaram valores negativos de 5 dB. Estes valores representam o acréscimo de energia proveniente da vibração dos painéis nessa frequência.

A melhora nos valores de TL pode ser verificada pelos testes de média apresentados nas tabelas 11 e 12, testemunha e com camada de ar respectivamente.

Tabela 11 - Teste de média - Testemunha – baixa frequência.

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
4	10.020000	a1
1	13.002500	a2
7	14.147500	a3
10	15.812500	a4
16	16.695000	a4
13	18.047500	a5

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela 12 - Teste de média – Camada de ar – baixa frequência.

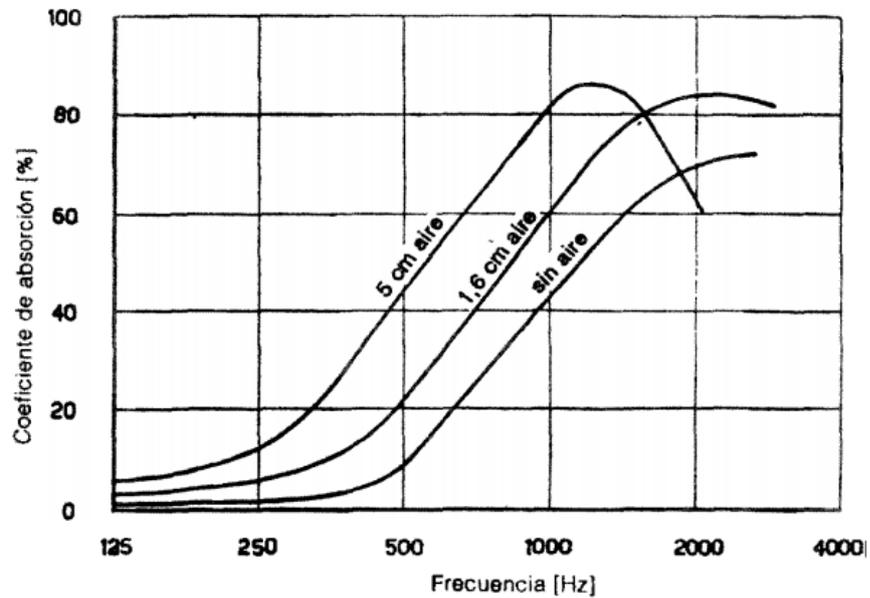
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
5	17.250000	a1
2	18.250000	a1
8	21.750000	a2
11	22.750000	a2
14	23.750000	a3
17	25.000000	a3

Fonte: Da Autora (2017).

Embora a diferença entre os valores máximos e mínimos de cada tabela seja próximo, percebe-se a superioridade dos valores da tabela 12 em relação à tabela 11 para todos os tratamentos.

Observou-se o desvio no mergulho de coincidência, que sem a camada de ar ocorreu entre 60 e 100 Hz e submetidos à camada de ar se deslocou para 60 Hz, provocando o aumento de TL. Esse deslocamento no mergulho de coincidência resultante da introdução da camada de ar foi relatado na literatura por Mendéz (1994). Na Figura 54, apresenta-se a absorção de painéis de lã de vidro montados sobre uma parede rígida com e sem camada de ar.

Figura 54 - Deslocamento do mergulho de coincidência.

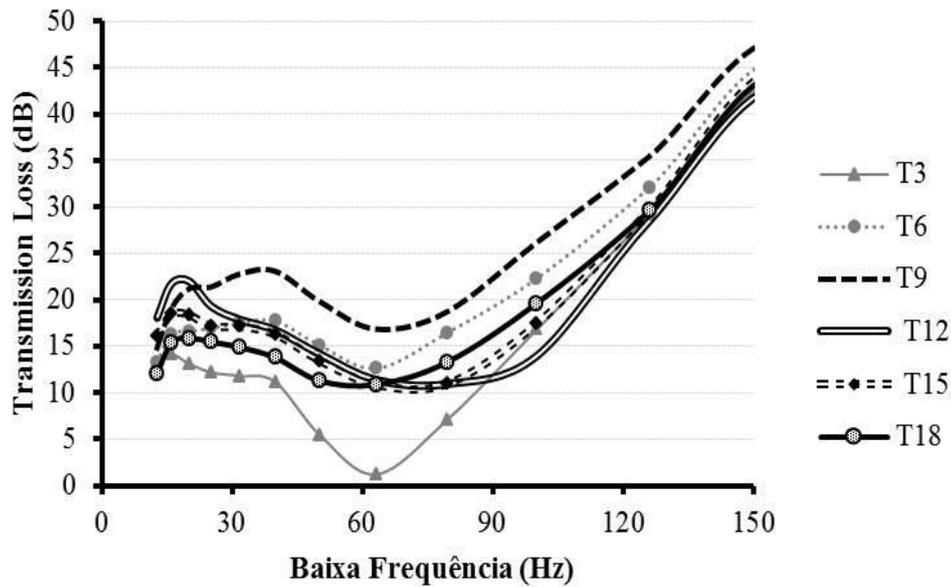


Fonte: Mendéz (1994).

Tomando-se como referência a linha de 40% de coeficiente de absorção, observa-se que o painel sem camada de ar atinge este valor próximo à frequência de 1000 Hz. Com 5 cm de camada de ar, esse valor é obtido já na frequência de 500 Hz. Ou seja, a introdução da camada de ar melhorou a absorção em 500 Hz.

Comparando os tratamentos testemunha (linha 1) com o aumento da espessura dos painéis (linha 3), observou-se também o acréscimo de TL e deslocamento do mergulho de coincidência, inclusive com ausência de ressonância dos painéis laboratoriais de baixa densidade como T3, representado por T2 (com camada de ar) e T1 (testemunha) nas figuras anteriores. Os tratamentos com dupla espessura podem ser observados na Figura 55.

Figura 55 - TL baixa frequência - Linha 3 – 0 a 150 Hz.

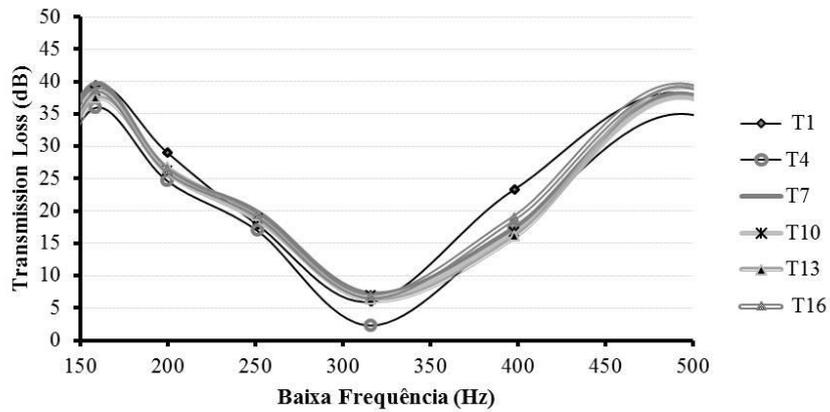


Fonte: Da Autora (2017).

Observou-se que a dupla espessura favoreceu os tratamentos com o bagaço de cana. Houve inclusive inversão na resposta de T9, que tem como correspondentes T8 (com camada de ar) e T7 (testemunha). Representando o mesmo tipo de painel, apenas sujeitos a condições diferentes, T9 superou os industriais T18, T15 e T12. O mesmo ocorreu com T6, que tem como correspondentes T5 (com camada de ar) e T4 (testemunha). Nessas duas últimas condições, o painel laboratorial de baixa densidade sofreu ressonância, ficando abaixo de 0 dB; já com dupla espessura superou inclusive os industriais que possuem densidade maior. Esse fato indica uma correlação entre dupla espessura e espécie, pois tanto T9 quanto T6, com diferentes densidades, superaram os demais. Ou seja, o fator espécie foi preponderante sobre o fator densidade para dupla espessura nessa faixa de frequência.

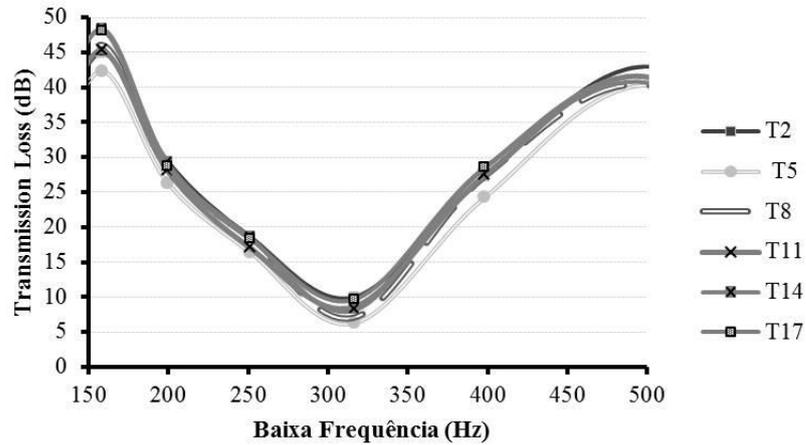
De 150 a 500 Hz, os tratamentos mantiveram respostas próximas entre si, porém com picos acima de 40 dB. Os resultados comprovaram que, já na faixa de baixa frequência, os incrementos da camada de ar e dupla espessura melhoraram a perda de transmissão sonora, Figuras 56, 57 e 58.

Figura 56 - TL baixa frequência - Linha 1 – 150 a 500 Hz.



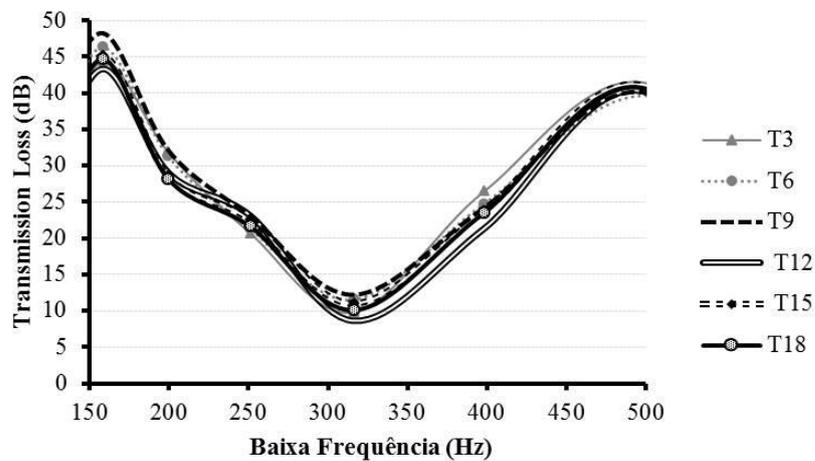
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 57 - TL baixa frequência - Linha 2 – 150 a 500 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

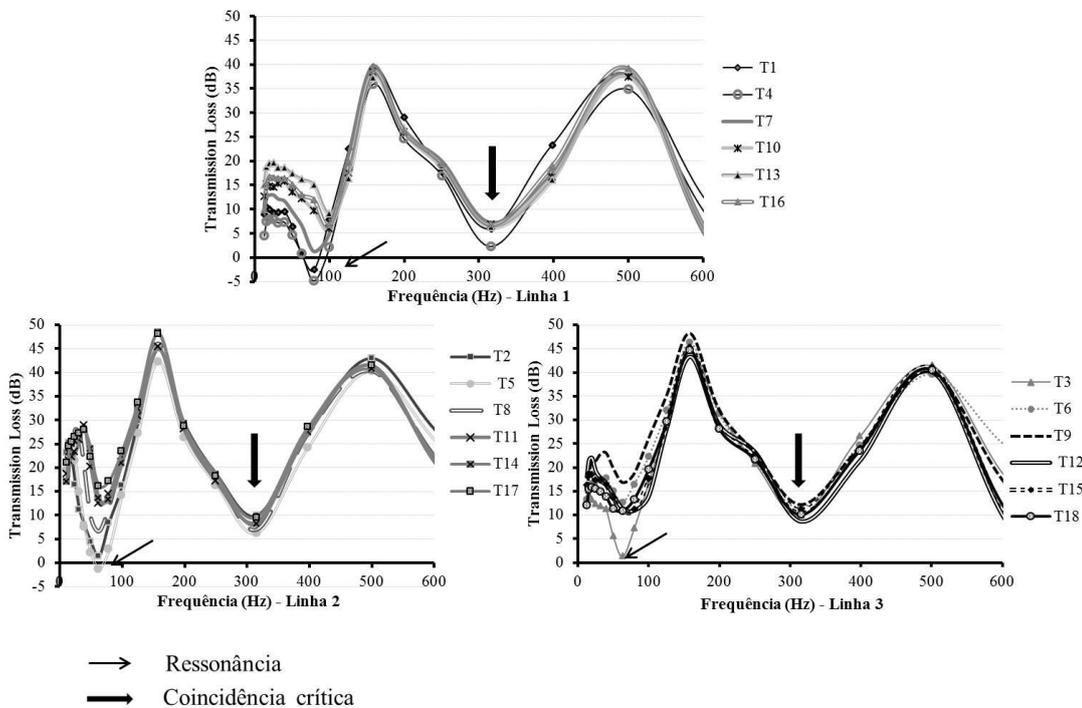
Figura 58 - TL baixa frequência - Linha 3 – 150 a 500 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Observou-se ainda que na baixa frequência houve perda acentuada de transmissão próxima a 60 Hz (ressonância), indicada pela seta simples, e 300 Hz (frequência crítica), indicada pela seta cheia, para todos os tratamentos, Figura 59. Pode-se inferir que talvez a característica de painéis fibrosos, mesmo de diferentes espécies, tenha mantido esta similaridade dos resultados em faixas específicas de frequência. Seria interessante e pertinente averiguar, em um próximo experimento, se a inclusão de outro tipo de material, espuma, metal ou compósitos híbridos modificaria este tipo de resposta e aumentaria a perda de transmissão neste intervalo de frequência.

Figura 59 - Ressonância de coincidência crítica na baixa frequência.



Fonte: Da Autora (2017).

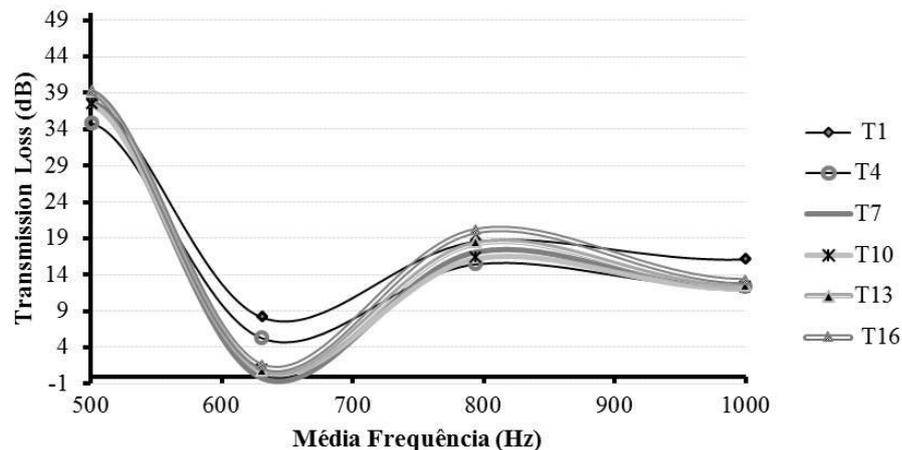
De acordo com Ljunggren (1991), abaixo da frequência de coincidência (300 Hz), o número de onda incidente é menor que o número de onda de flexão no painel, determinando a predominância de ondas forçadas. Com o aumento da frequência, o número de ondas incidentes se aproxima do número de ondas de flexão do painel. Quando a projeção do comprimento de onda incidente (onda plana) é igual ao comprimento de onda livre à flexão, ao longo do painel, e a velocidade de propagação da onda incidente se iguala à velocidade de propagação da onda de flexão, ocorre o efeito de coincidência, ou frequência crítica, gerando um mecanismo de transferência de energia entre o ar, a superfície sólida e o ar do outro lado da superfície. Assim, o isolamento do painel é reduzido e ocorre queda na curva da perda por

transmissão. Abaixo de 100 Hz, no regime controlado pela rigidez, pode-se observar a distinção entre as curvas de TL, constatando as diferentes especificidades dos tratamentos que, nesse intervalo respondem de forma diferenciada. Porém, a distinção que ocorreu entre os tratamentos abaixo de 175 Hz, não foi observada para frequências até 500 Hz em todas as condições de análise, ou seja, nas linhas 1, 2 e 3. A quase sobreposição dos tratamentos acima de 175 Hz, evidencia a ineficácia dos incrementos camada de ar e dupla espessura para a qualificação das diferentes condições, em relação à propriedade analisada. No entanto, observou-se o aumento de TL nas duas condições analisadas, com camada de ar e dupla espessura em relação à testemunha (Linha 1).

7.3.2 Comparação entre os tratamentos na média frequência

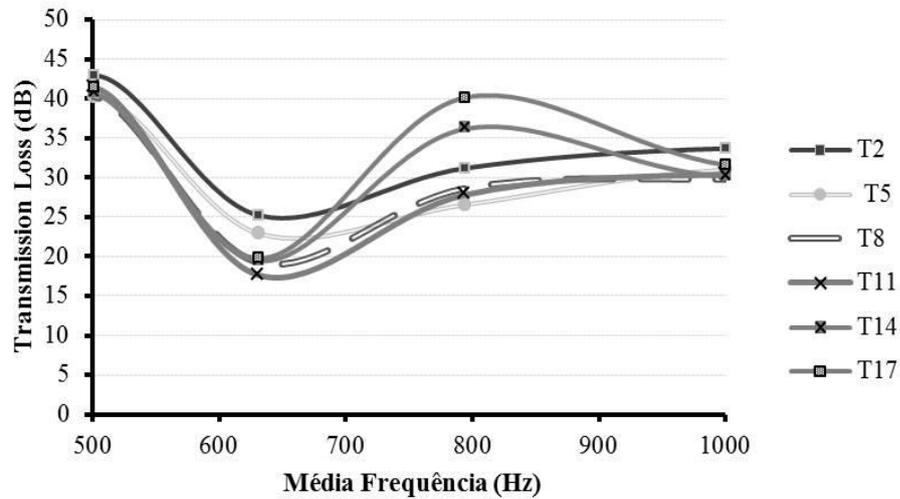
Em média frequência, no intervalo e 500 a 1000 Hz, os tratamentos testemunha apresentaram mesma tendência com ligeiro destaque de T1 e T4, painéis laboratoriais de baixa densidade, entre 600 e 700 Hz. Quando submetidos à camada de ar, houve um acréscimo para esses tratamentos (T2 e T5, respectivamente) de 16 dB. Observou-se também um pico de 35 a 40 dB para os tratamentos com madeira (T14 e T17) superando os demais entre as frequências de 700 e 900 Hz, Figuras 60 e 61.

Figura 60 - TL Média frequência – Linha 1- 500 a 1000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

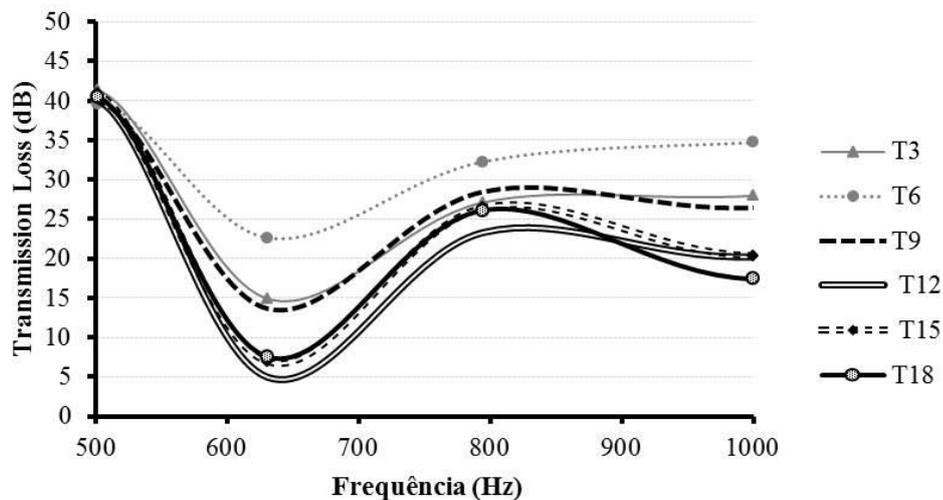
Figura 61 - TL Média frequência – Linha 2- 500 a 1000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Quando submetidos à dupla espessura, os tratamentos foram mais diferenciados entre si apresentando valores inferiores a 15 Hz, no intervalo de 600 a 700 Hz. À exceção do painel laboratorial de baixa densidade sem nanopartículas (T6). Como $T2 > T5$ (com camada de ar) e $T6 > T3$ (em dupla espessura) pode-se inferir que duas correlações se estabeleceram para os tratamentos com painéis de baixa densidade nesta frequência: presença de nanopartículas com camada de ar e ausência de nanopartículas e dupla espessura. As respostas de TL para a condição de dupla espessura na faixa de 500 a 1000 Hz estão no gráfico da Figura 62.

Figura 62 - TL Média frequência – Linha 3- 500 a 1000 Hz.

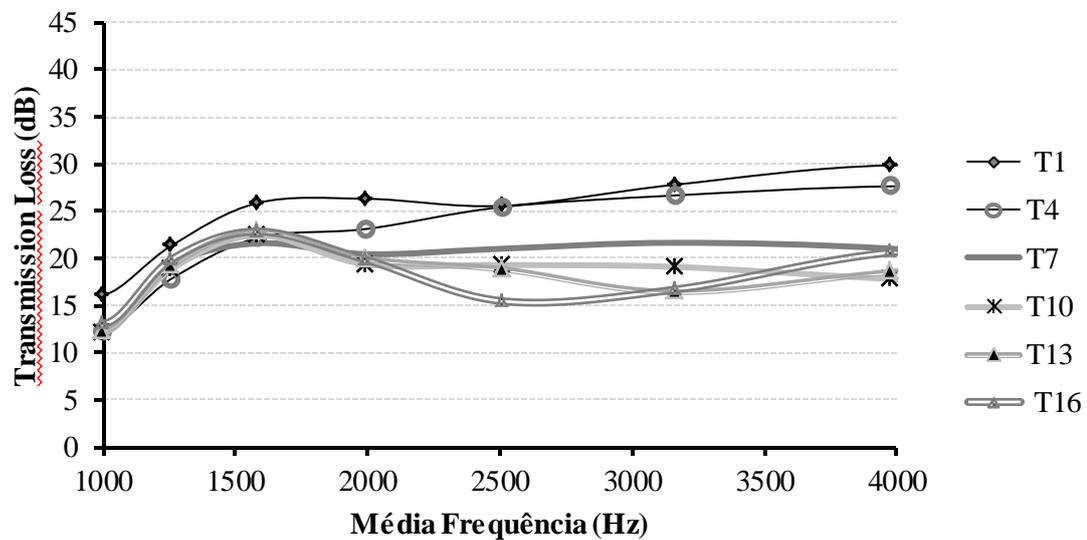


Fonte: Da Autora (2017).

Ao contrário da simulação com camada de ar, em dupla espessura os painéis industriais foram claramente inferiores na resposta de TL não sendo observado o pico entre 700 e 900 Hz para os tratamentos T15 e T18.

Ainda na faixa de média frequência, no intervalo de 1000 a 4000 Hz, observou-se aumento nos valores de TL e maior regularidade nas respostas dos tratamentos testemunha, que se mantiveram entre 15 e 30 Hz, porém com destaque para os painéis de baixa densidade T1 e T4, como mostra o gráfico da Figura 63.

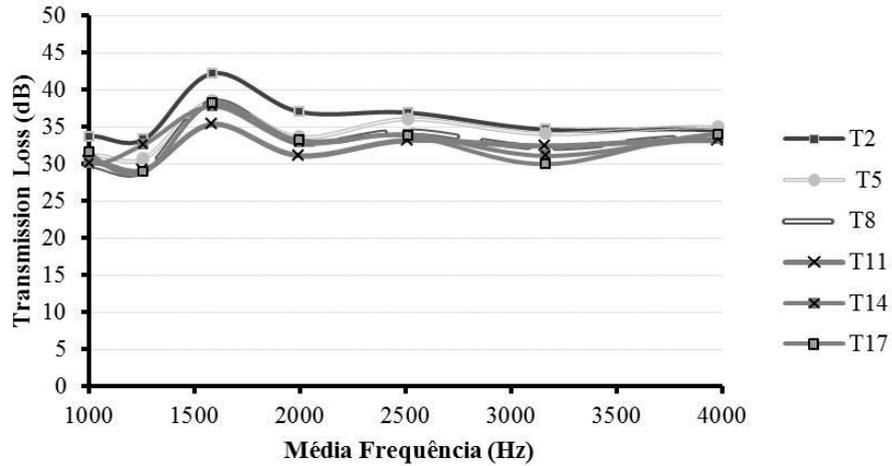
Figura 63 - TL Média frequência – Linha 1- 1000 a 4000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Submetidos à camada de ar, os tratamentos sofreram aproximação e aumento nos valores de TL, ficando acima de 30 dB, Figura 64.

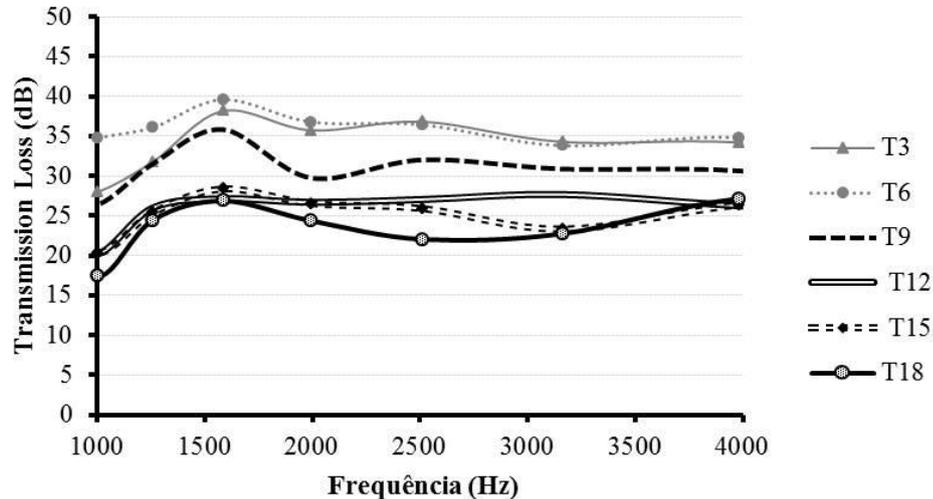
Figura 64 - TL Média frequência – Linha 2- 1000 a 4000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Com dupla espessura, os tratamentos também apresentaram melhora em relação à testemunha, com valores entre 17 e 40 dB. Ao apresentar maior diferenciação entre si, observou-se a superioridade dos tratamentos laboratoriais e entre eles os de baixa densidade, Figura 65.

Figura 65 - TL Média frequência – Linha 3- 1000 a 4000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Nas três situações de simulação (linhas 1, 2 e 3) analisadas, observou-se forte correlação entre média frequência e baixa densidade dos painéis. Esse fato pode ser atestado pelas médias das análises de variância apresentadas nas tabelas 13, 14 e 15, nas quais as maiores médias e os melhores tratamentos estão em destaque.

Tabela 13 - Teste de média - testemunha – média frequência.

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
10	18.330000	a1
13	18.622500	a1
16	18.895000	a2
7	19.172500	a2
4	21.067500	a3
1	23.750000	a4

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela 14 - Teste de média - camada de ar – média frequência.

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
11	31.250000	a1
8	32.000000	a1
14 *	32.750000	a2
5	32.750000	a2
17 *	33.250000	a2
2	35.250000	a3

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela 15 - Teste de média - dupla espessura – média frequência.

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
18	24.000000	a1
12	24.750000	a1
15	25.250000	a1
9	30.000000	a2
3	32.250000	a2
6	34.750000	a2

Fonte: Da Autora (2017).

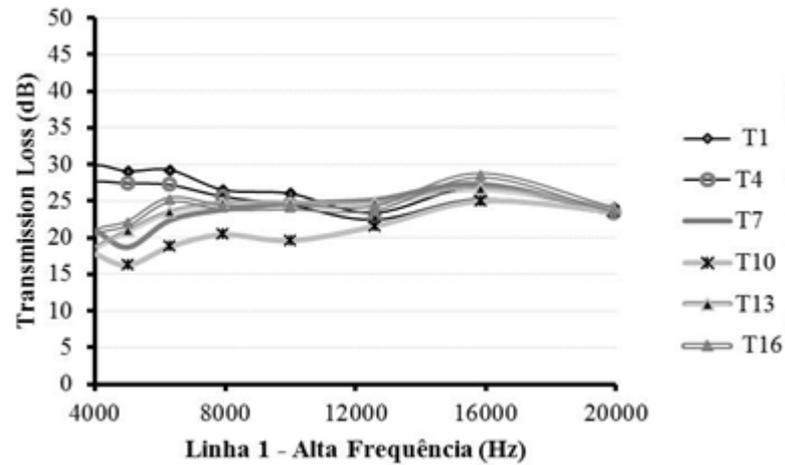
É possível observar a superioridade das médias T2 e T6 em relação à T1. Observa-se ainda que, apesar das médias de T2 e T6 serem próximas, o tratamento com camada de ar (T2) foi ainda superior ao de dupla espessura (T6). Os tratamentos T14 e T17 com asterisco (*) na tabela 14, correspondem ao pico que atingiram entre as frequências de 700 e 900 Hz mostrados anteriormente na Figura 7.12.

A importância do estudo de redução de ruído em médias frequências é tão importante que a maioria das classificações de grau de perda auditiva utiliza a média de tons puros, nas frequências de maior energia, 500, 1000 e 2000 Hz (RUSSO et al., 2009). Fletcher (1953) em seus estudos, observou que a contribuição para a inteligibilidade de fala é específica de determinadas faixas de frequências. Para sons abaixo de 500 Hz, há uma concentração de 60% da energia, porém, com apenas 5% de contribuição para a inteligibilidade da fala. Nas frequências de 500 a 1000 Hz, tanto a energia quanto a inteligibilidade situam-se em torno de 35%; e, finalmente, acima de 1000 Hz, encontramos apenas 5% de energia acústica responsável pelo impacto de 60% da inteligibilidade da informação. As respostas na média frequência, não só apresentaram interação entre os tratamentos sob os efeitos analisados, como foram interações com as médias mais altas em relação às faixas de frequência baixa e alta.

7.3.3 Comparação entre os tratamentos na alta frequência

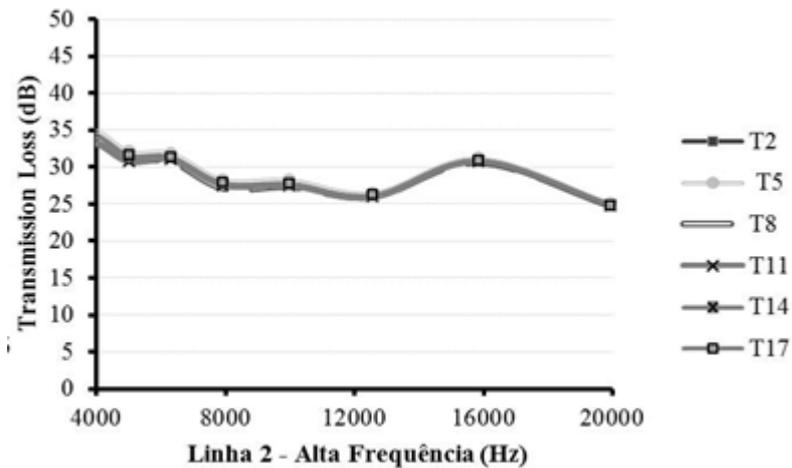
Os resultados mostraram que, na alta frequência, os tratamentos tendem a ter respostas bem próximas. As diferentes características dos tratamentos em função das duas condições analisadas, camada de ar e dupla espessura não determinaram comportamentos diferenciados acima de 12000 Hz e, no caso específico da camada de ar (Linha 2), a análise de variância foi não significativa. No entanto, houve discreta melhora para os tratamentos com densidades maiores dos painéis, alcançando os de menor densidade. A tendência de aproximação entre os tratamentos se acentuou na alta frequência. Inclusive em relação à linha 2 (com camada e ar), cuja análise de variância nem foi significativa, Figuras 66, 67 e 68.

Figura 66 - TL Alta frequência – Linha 1- 1000 a 4000 Hz.



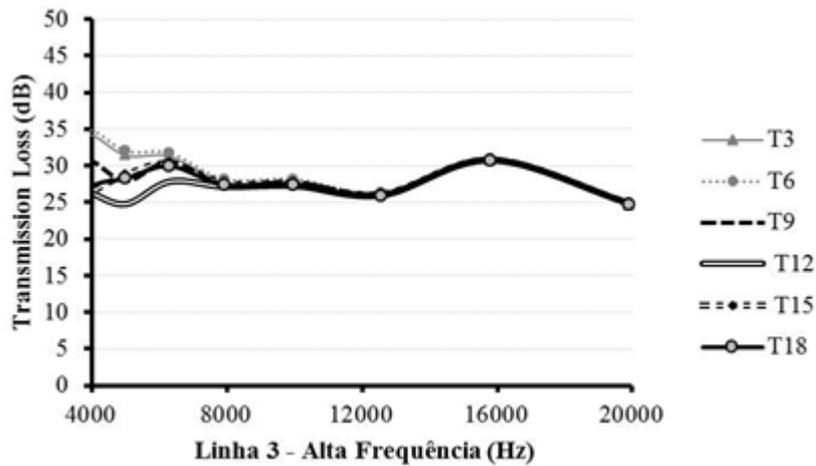
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 67 - TL Alta frequência – Linha 2- 1000 a 4000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

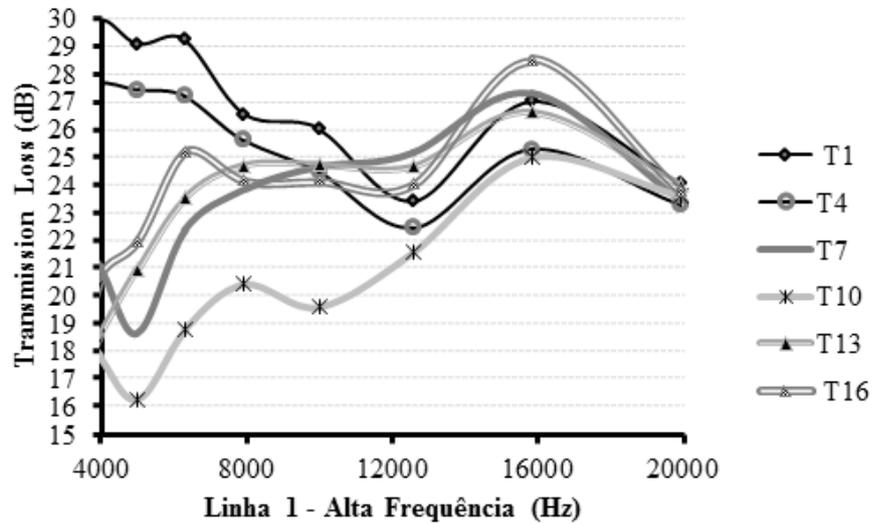
Figura 68 - TL Alta frequência – Linha 3- 1000 a 4000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Os tratamentos testemunha apresentaram maior diferença entre si com valores entre 16 e 30 dB, Figura 69.

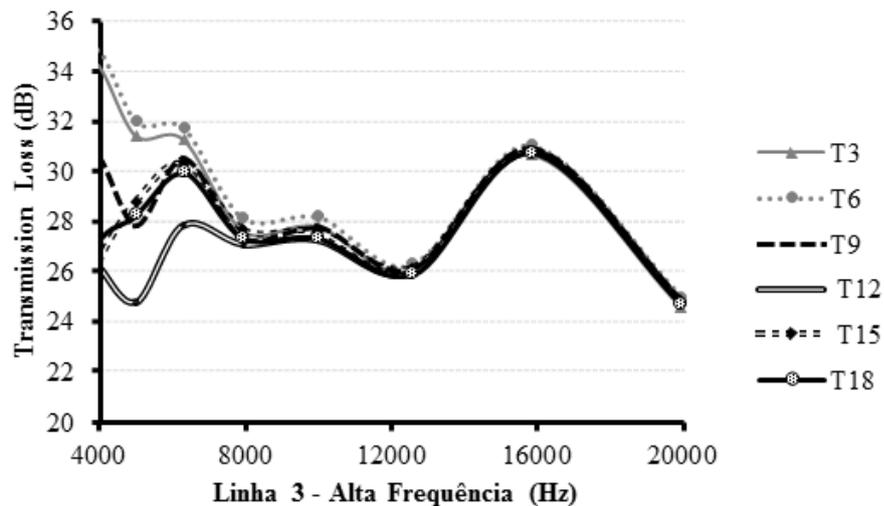
Figura 69 - TL Alta frequência – Linha 1- 1000 a 4000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Os tratamentos com dupla espessura apresentaram diferenciação até a frequência de 12000 Hz, entre 25 e 34 dB, Figura 70.

Figura 70 - TL Alta frequência – Linha 3- 1000 a 4000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Porém, em ambos os casos, verificou-se a superioridade dos tratamentos com painéis de baixa densidade, no caso da testemunha, painéis com nanopartículas (T1); no caso de dupla

espessura, painéis sem nanopartículas (T6), como pode ser constatado pelas tabelas 16 e 17 que tem seus respectivos valores destacados.

Tabela 16 - Teste de média - testemunha – alta frequência.

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
10	20.722500	a1
7	23.637500	a2
13	24.162500	a2
16	24.530000	a3
4	25.090000	a3
1	26.460000	a4

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela 17 - Teste de média - dupla espessura – alta frequência.

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
12	26.750000	a1
18	27.750000	a2
15	28.000000	a2
9	28.000000	a2
3	28.250000	a2
6	29.000000	a3

Fonte: Da Autora (2017).

7.4 Análise dos resultados por tipo de efeito para a espécie bagaço de cana

7.4.1 Influência da presença e ausência de nanopartículas

Foram mantidas as mesmas características para cada par analisado, à exceção da presença e ausência de nanopartículas. As interações estão destacadas na tabela 18.

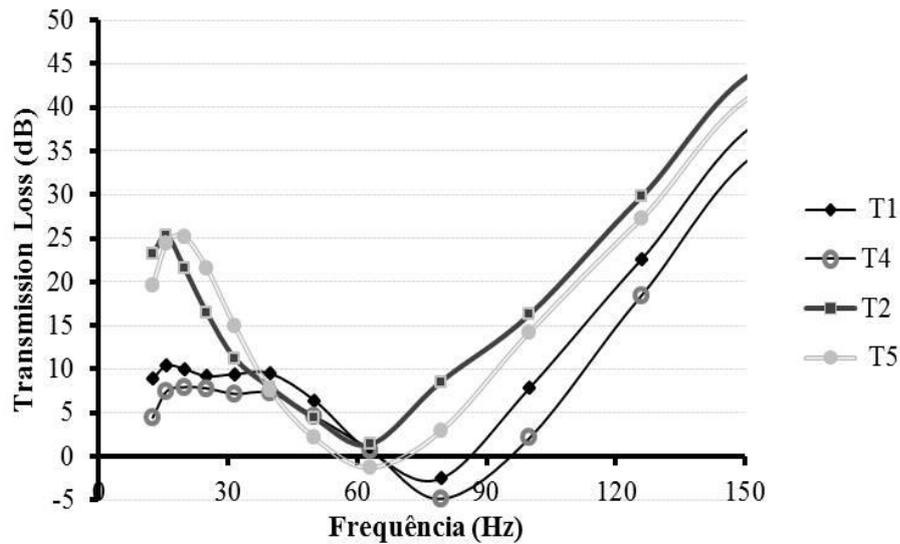
Tabela 18 - Interações entre os tratamentos – nanopartículas.

TIPOS DE PAINEL		Cana	Cana
		Laboratório	Laboratório
ESPESSURA	MEIOS	0,35 g/cm ³ com nano	0,35 g/cm ³ sem nano
15 mm	3	T1	T4
15 mm	5	T2	T5
30 mm	3	T3	T6

Fonte: Da Autora (2017).

Comparando presença e ausência de nanopartículas dos painéis na faixa de 0 a 150 Hz, verifica-se superioridade dos tratamentos T1 e T2 em relação aos seus similares, sem nanopartículas T4 e T5 respectivamente, Figura 71.

Figura 71 - Efeito nanopartículas – camada de ar – 0 a 150 Hz.

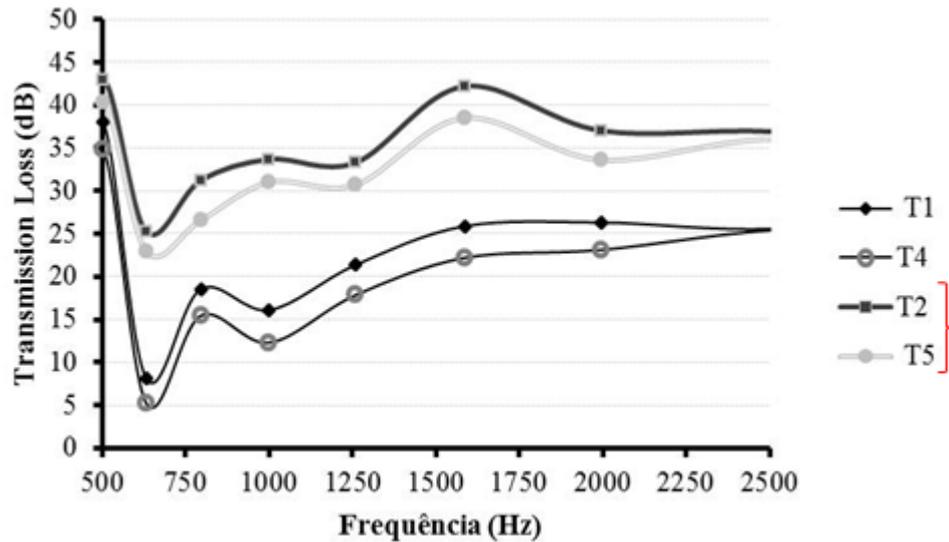


Fonte: Da Autora (2017).

Ao acrescentar a camada de ar, percebe-se a alteração positiva nos valores de TL, inclusive com deslocamento do mergulho de ressonância em 60 Hz; frequência a partir da qual o tratamento com nanopartículas se mostra superior. O acréscimo da camada e ar ocorreu na ordem de 15 dB até 30 Hz; a partir daí, houve a inversão na resposta entre T2 e T5 e os painéis com nanopartículas obtiveram valores maiores em todo o intervalo de baixa frequência.

Na faixa de 500 a 2500 Hz, verificou-se a superioridade dos tratamentos que receberam as nanopartículas em relação aos seus similares (testemunha), $T1$ e $T2 > T4$ e $T5$, respectivamente, Figura 72.

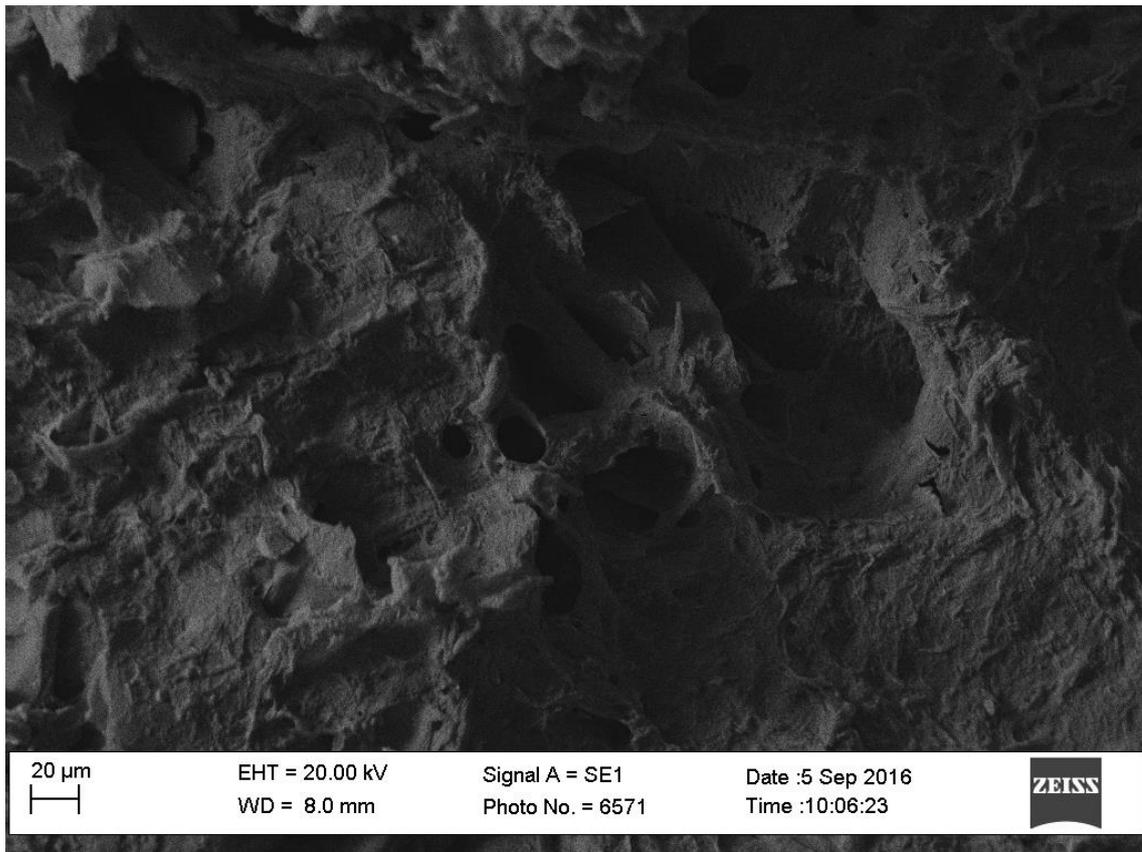
Figura 72 - Efeito nanopartículas – camada de ar – 500 a 2500 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Submetidos à camada de ar, os tratamentos com nano partículas tiveram influência direta sobre o aumento de TL. As possíveis causas podem estar relacionadas à estrutura superficial irregular das faces dos painéis, gerando áreas com diferentes tamanhos de orifícios e diferentes profundidades, como se mostra na Figura 73.

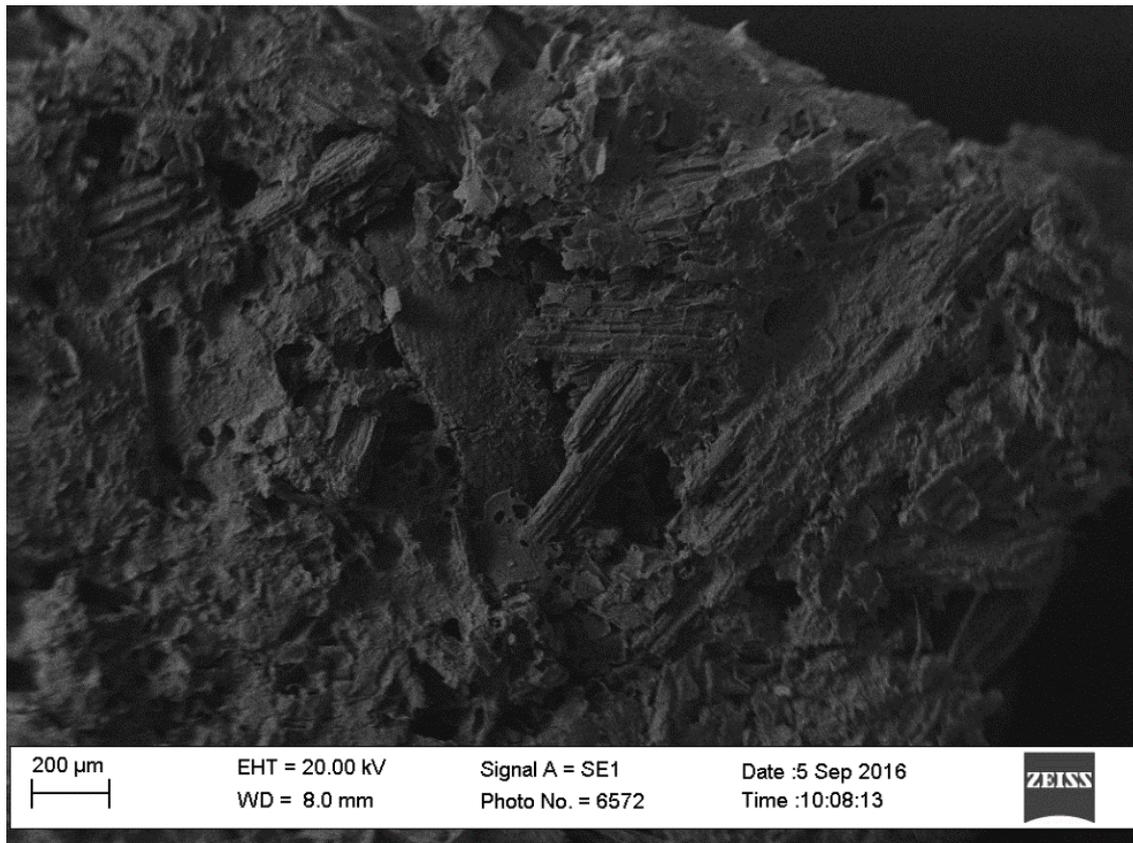
Figura 73 - MEV da face do painel com nanopartículas.



Fonte: Da Autora (2017).

Este tipo de superfície proporcionou diferentes respostas da estrutura à pressão sonora incidente, como dissipação por múltiplas reflexões entre a camada de nanopartículas e a estrutura, funcionando como um material poroso. Além disso, a vibração das fibras do próprio painel ajudou a dissipar parte da energia, por meio do atrito com o ar, gerando calor. A irradiação da onda sonora através do painel para dentro da camada de ar sofreu mudança de meio e, por conseguinte, mudança de velocidade da onda sonora determinando diferentes e novos ângulos de incidência no próprio painel com diferentes padrões de dissipação. O mesmo tipo de painel sem as nanopartículas (T4 e T5) apresentou aspecto diferenciado com áreas ora reentrantes, ora protuberantes, porém mais homogêneas, menos aeradas, Figura 74.

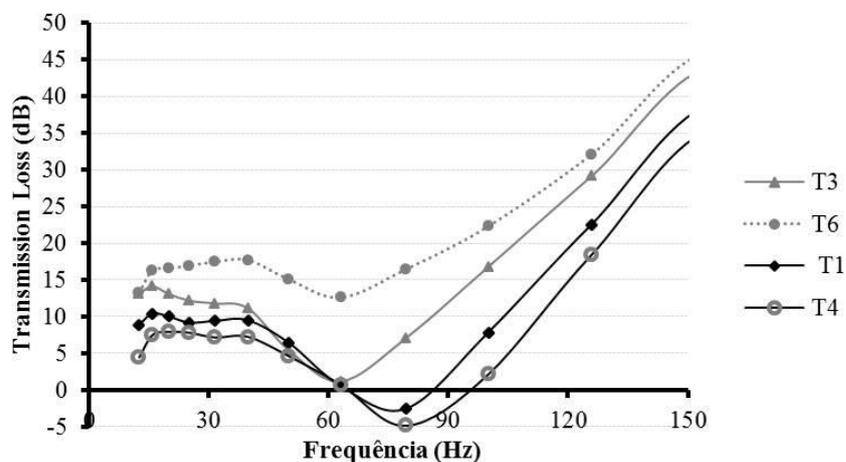
Figura 74 - MEV da face do painel sem nanopartículas.



Fonte: Da Autora (2017).

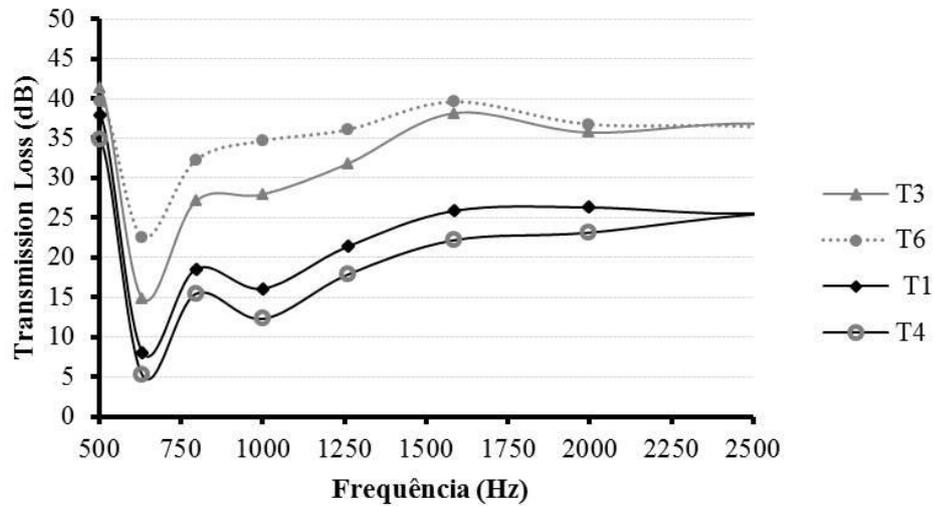
Para os tratamentos com dupla espessura, no intervalo de 0 a 150 Hz e de 500 a 2500 Hz, ocorreu o contrário. O tratamento T6 (sem nanopartículas) foi superior ao T3 (com nanopartículas). Os resultados mostraram, portanto, que houve interação positiva entre dupla espessura e ausência de nanopartículas, Figuras 75 e 76.

Figura 75 - Efeito nanopartículas – dupla espessura – 0 a 150 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Figura 76 - Efeito nanopartículas – dupla espessura – 500 a 2500 Hz.

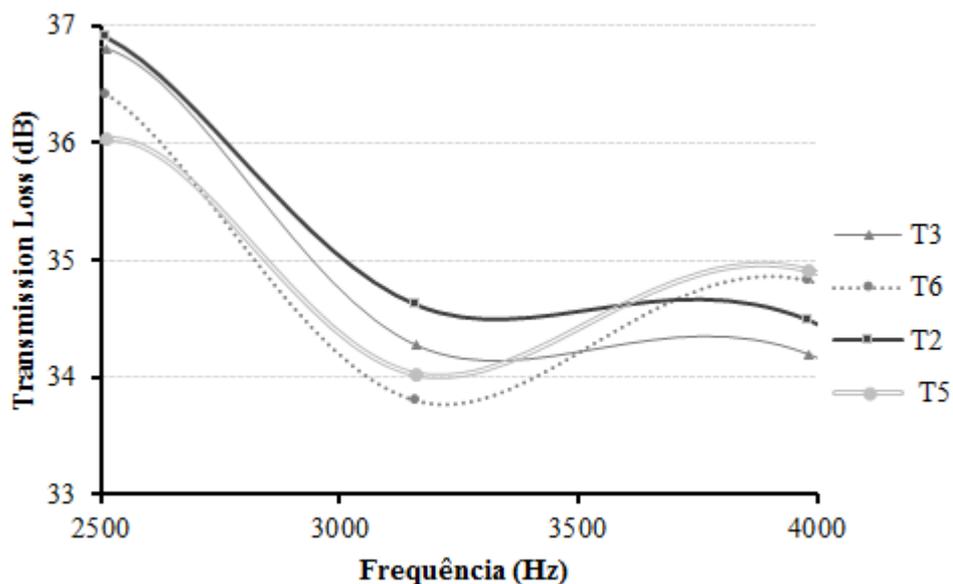


Fonte: Da Autora (2017).

O aumento da espessura só favoreceu o painel mais homogêneo (T6), sem nanopartícula, na baixa frequência, cuja principal característica é a transmissão marginal, pela estrutura.

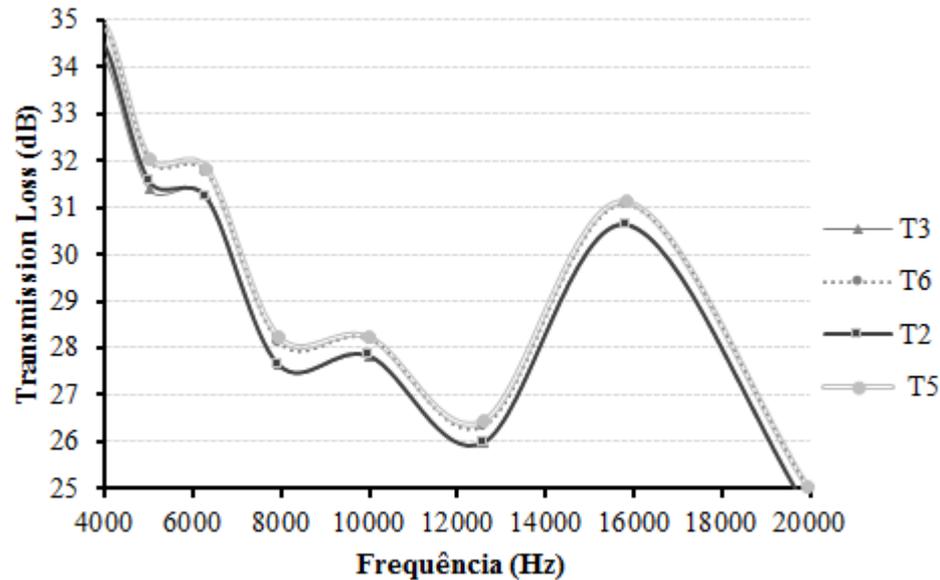
Acima de 2500 Hz até 20.000 Hz, já na faixa de alta frequência, Os efeitos de espessura e camada de ar foram superados pelo efeito de presença e ausência de nanopartículas. Até 3500 Hz prevaleceram os tratamentos com nanopartículas, Figura 77; acima dessa frequência, ocorreu inversão e os tratamentos sem nanopartículas passaram a responder melhor, apesar da aproximação entre as curvas, Figura 78.

Figura 77 - Efeito nanopartículas – Camada de ar x Espessura – 2500 a 4000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Figura 78 - Efeito nanopartículas – Camada de ar x Espessura – 4000 a 20.000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

7.4.2 Influência da densidade entre painéis laboratoriais

As interações que destacam o efeito da densidade do painel de cana na perda de transmissão sonora envolvem os tratamentos de T4 a T9 conforme indicado na tabela 19.

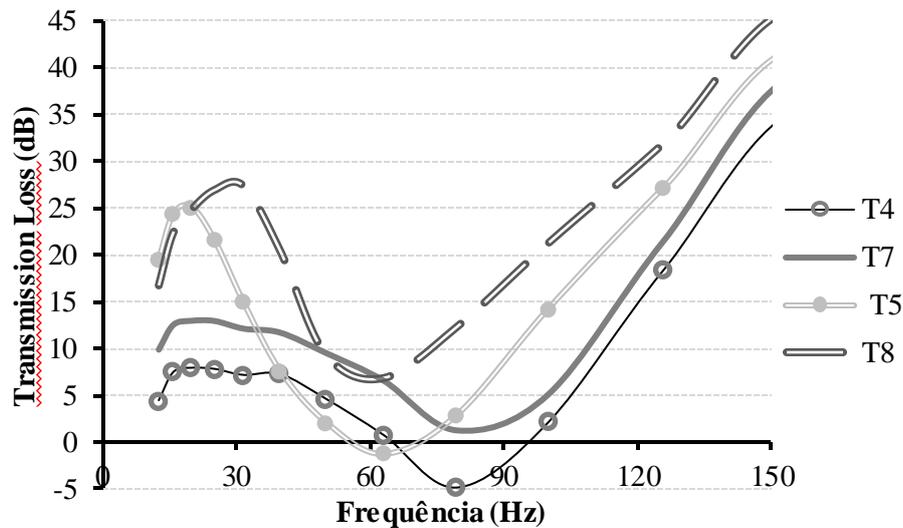
Tabela 19 - Interações entre os tratamentos – densidade.

TIPOS DE PAINEL		Cana Laboratório 0,35 g/cm ³ sem nano	Cana Laboratório 0,55 g/cm ³
ESPESSURA	MEIOS		
15 mm	3	T4	T7
15 mm	5	T5	T8
30 mm	3	T6	T9

Fonte: Da Autora (2017).

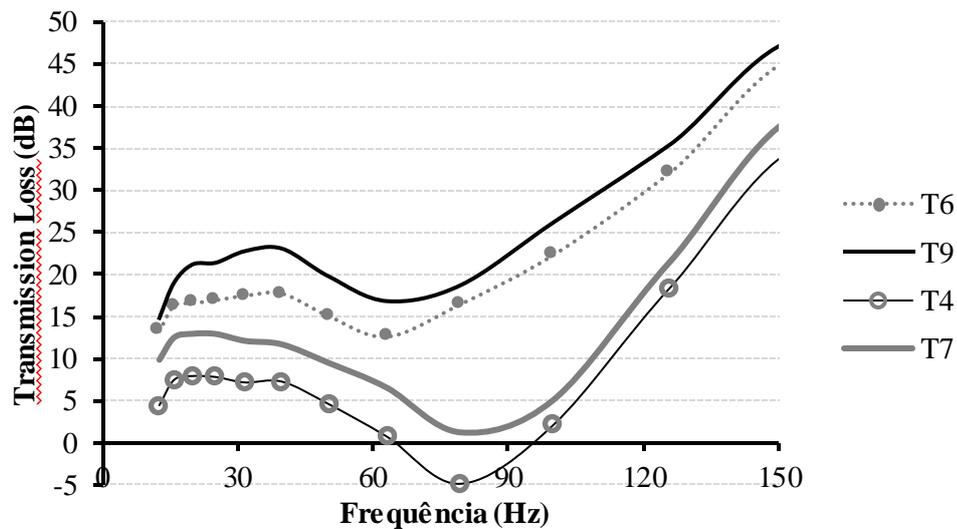
Em baixa frequência, no intervalo de 0 a 150 Hz, os tratamentos com maior densidade, T8 (camada de ar), T9 (dupla espessura) e T7 prevaleceram sobre os de menor densidade T5, T6 e T4 respectivamente, Figuras 79 e 80.

Figura 79 - Efeito densidade – Camada de ar – 0 a 150 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

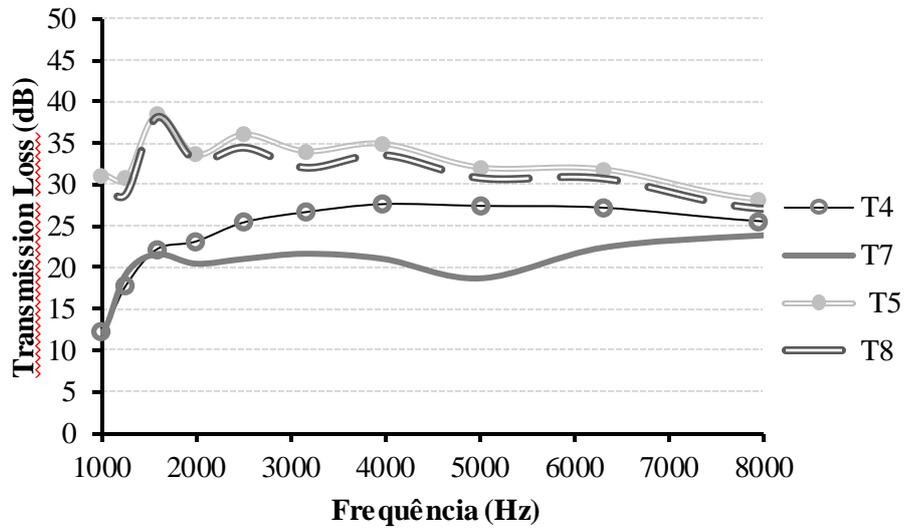
Figura 80 - Efeito densidade – dupla espessura – 0 a 150 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

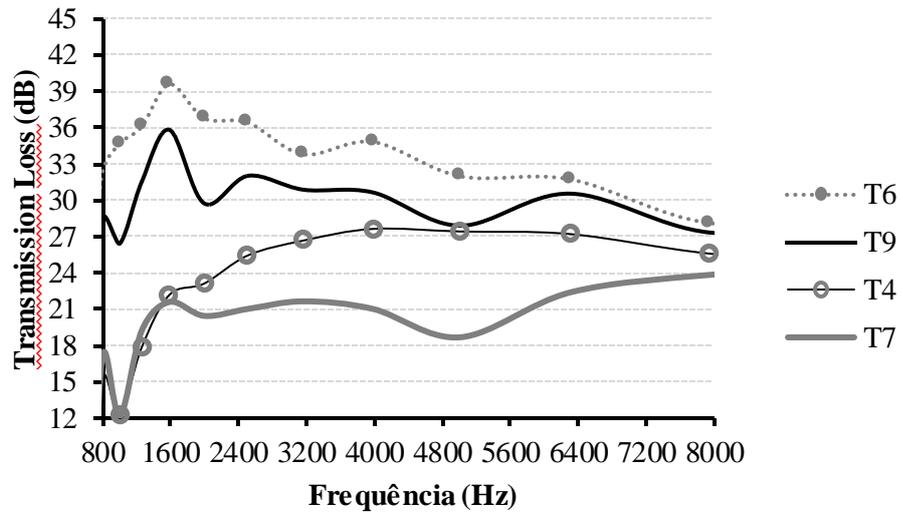
Acima de 1000 Hz, a situação se inverte tanto para os tratamentos com camada de ar, como para os de dupla espessura. T5 prevalece sobre T8 e T6 sobre T9 até o final do intervalo em 20.000 Hz. Mas os tratamentos testemunha se comportaram de maneira diferente até 10.000 Hz, em que prevaleceu novamente a maior densidade. No intervalo de 1.000 a 10.000 Hz, as menores densidades apresentaram valores superiores indicando a forte influência nesta faixa de frequência e sem os efeitos camada de ar e dupla espessura, Figuras 81 a 84.

Figura 81 - Efeito densidade– Camada de ar – 1.000 a 8.000 Hz.



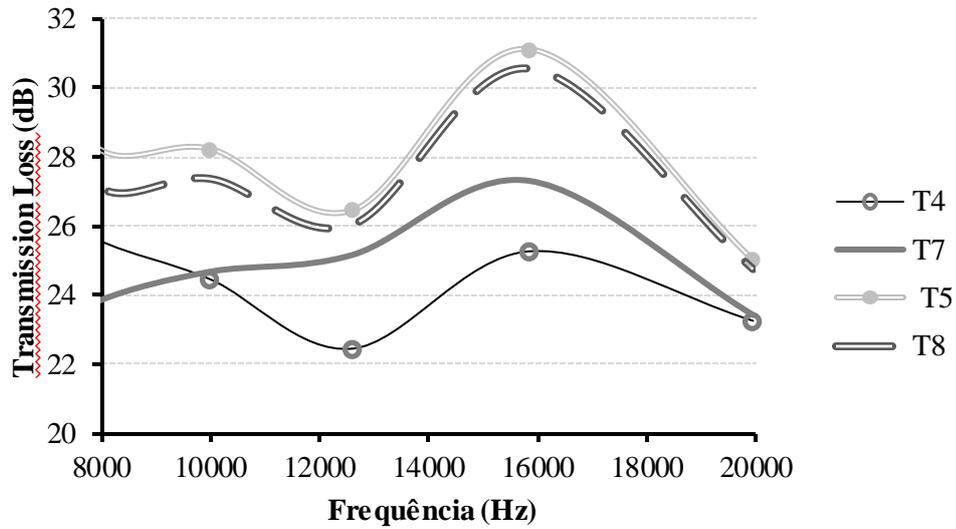
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 82 - Efeito densidade– dupla espessura – 800 a 8.000 Hz.



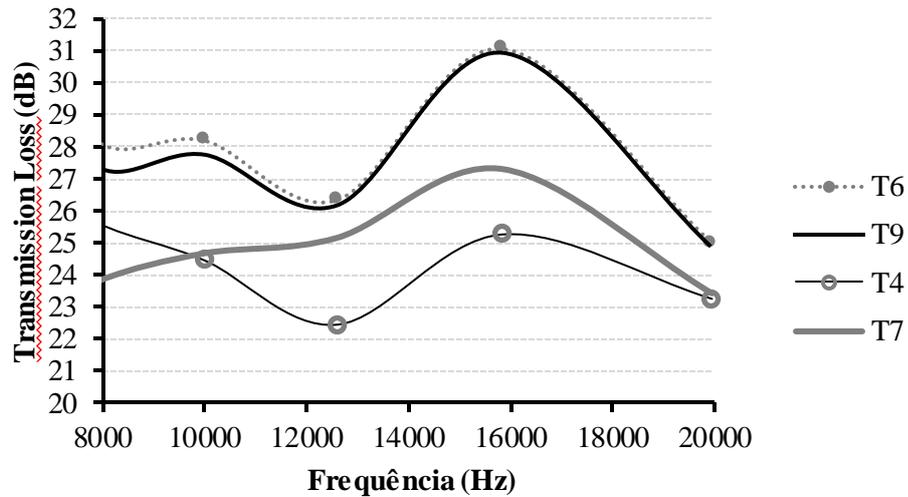
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 83 - Efeito densidade– Camada de ar – 8.000 a 20.000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Figura 84 - Efeito densidade– dupla espessura – 8.000 a 20.000 Hz.

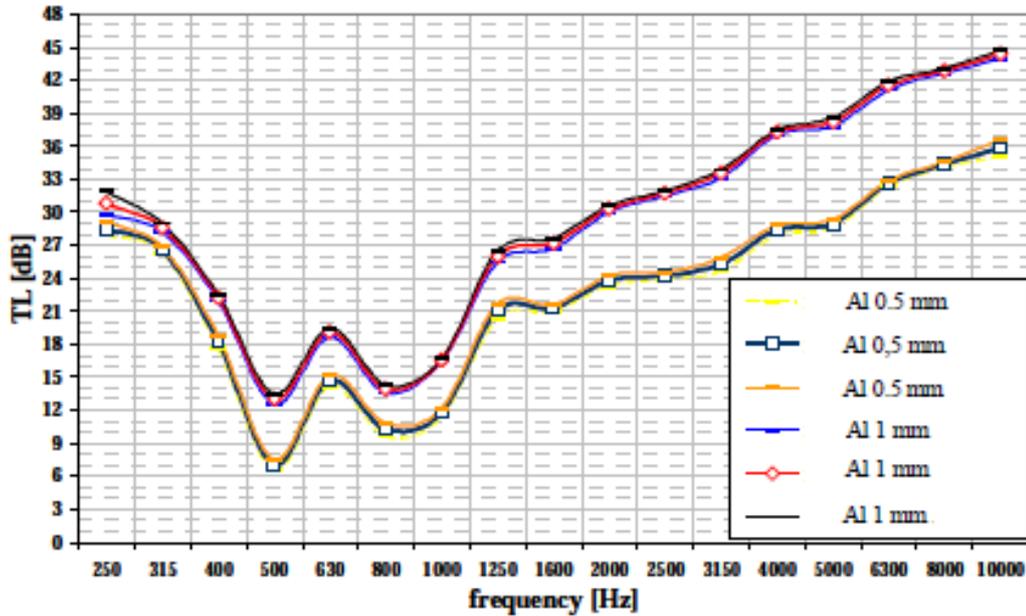


Fonte: Da Autora (2017).

7.4.3 Influência da espessura no aumento de TL

A influência da espessura para o aumento de TL foi constatada em um estudo de modelagem e predição vibro-acústica de Polito e Marulo (2010), que utilizaram câmaras reverberantes separadas por três tipos de divisórias de alumínio com diferentes ligas e três tipos de espessura. Os resultados mostraram que, embora os valores de TL para os painéis duplicados (de 0,5 para 1,0 mm) se mostrassem superiores até 4000 Hz, Figura 85.

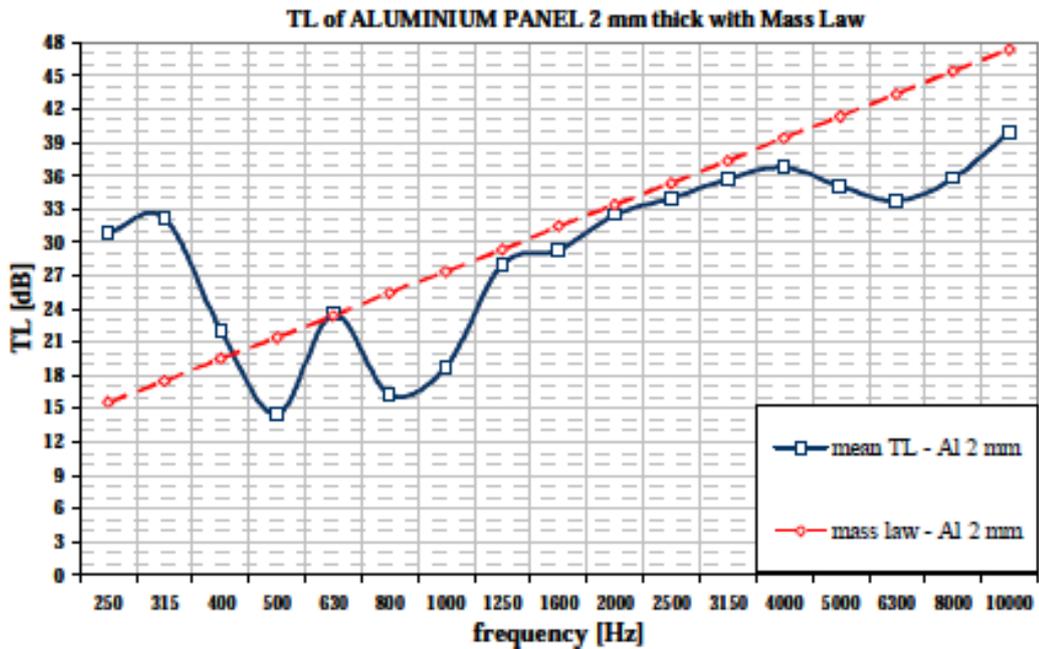
Figura 85 - TL em divisórias de alumínio - 0.5mm x 1mm.



Fonte: Polito e Marulo (2010).

Acima desse valor, o aumento de espessura para 2 mm não correspondeu ao aumento de TL, que passou a sofrer queda, Figura 86.

Figura 86 - TL em divisórias de alumínio - 2mm.

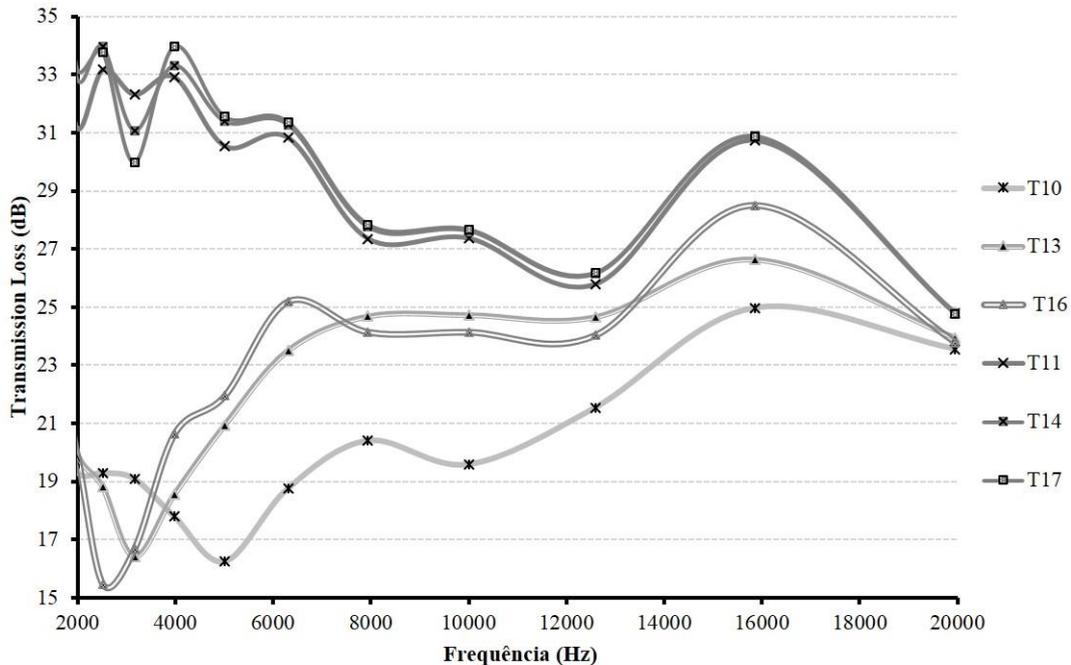


Fonte: Polito e Marulo (2010).

Pode-se inferir que existe um limite de espessura para eficiência na perda de transmissão sonora nos materiais, pois os painéis aglomerados celulósicos também

apresentaram a mesma tendência de queda após 4.000 Hz. Enquanto os tratamentos T10, T13 e T16, que não receberam dupla espessura apresentaram aumento de TL até 12.000 Hz, os de dupla espessura diminuíram. Depois apresentaram a mesma tendência, Figura 87.

Figura 87 - Painéis industriais – dupla espessura – 2.000 a 20.000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

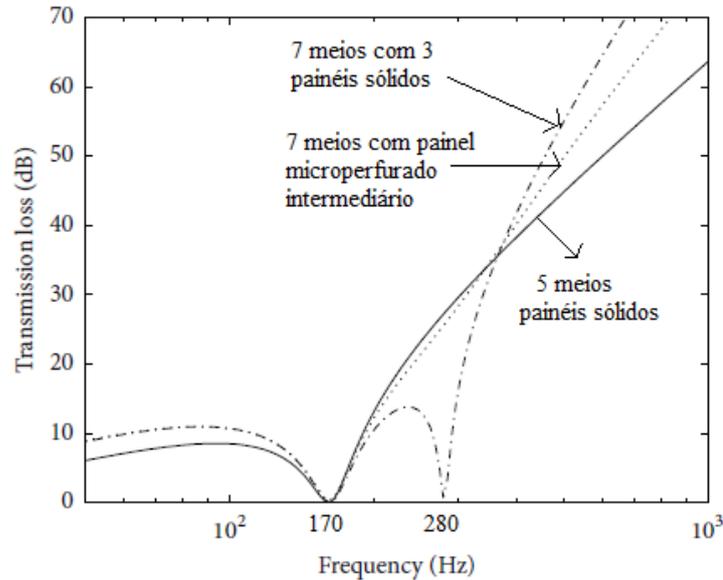
Embora os materiais do estudo em questão e dessa pesquisa sejam diferentes por origem (inorgânica) e em espessura (0,5; 1 e 2 mm adotados no estudo e 15 mm nessa pesquisa), os valores de TL variaram dentro de limites próximos, 6 a 45 dB (alumínio) e -5 a 45 dB (painéis celulósicos) para todo o intervalo de frequência. Contudo as regiões de maiores e menores amortecimentos, representadas pelos picos e frequências críticas respectivamente, ocorreram em faixas diferentes. Esse fato sugere que uma conjugação híbrida desses materiais poderia complementar os intervalos de menor eficácia acústica de ambos.

7.4.4 Influência da camada de ar no aumento de TL

Em uma pesquisa sobre perda de transmissão sonora em sistemas com camada de ar, Putra et al. (2013) estudaram a introdução de painel microperfurado entre painéis sólidos de alumínio. Segundo os autores, o uso de materiais absorventes entre painéis duplos pode gerar dois tipos de efeito: acréscimo de massa, promovendo o aumento de TL em faixas de baixa frequência e vibração fora de fase entre painéis, gerando redução da ressonância dos mesmos

e conseqüente aumento de TL. Na Figura 88, mostra-se a perda de transmissão sob Incidência normal de propagação acústica para camada dupla, 5 meios sendo dois painéis sólidos; tripla, com três painéis sólidos e dupla com painel microperfurado no meio dos dois painéis sólidos.

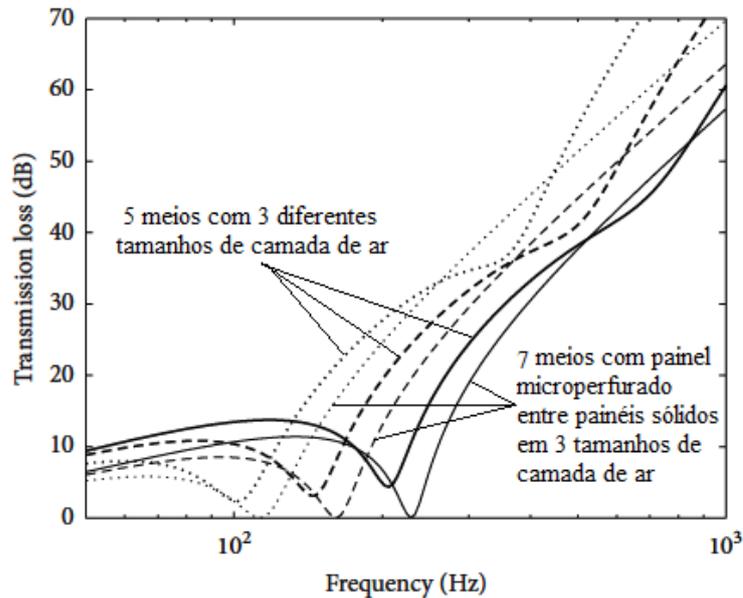
Figura 88 - Comparação de TL em painéis com diferentes camadas de ar.



Fonte: Putra et al. (2013).

Os autores observaram que a introdução de outro painel sólido entre painéis duplos produziu a segunda ressonância em 280 Hz. Mas a introdução do painel microperfurado eliminou a segunda ressonância e apresentou valores superiores ao de camada dupla apenas, 5 meios. O amortecimento adicional decorrente da força viscosa nos orifícios do painel influenciou a camada de ar na frente do painel sólido violando a ressonância massa-ar-massa e acabando por eliminá-la. As diferentes larguras da camada de ar também influenciaram na TL. Na Figura 89, apresentam-se dois tipos de sistemas, com 5 e 7 camadas em 3 distâncias diferentes.

Figura 89 - Comparação de TL em painéis com diferentes tamanhos de camada de ar.



Fonte: Putra et al. (2013).

Nota: 5 camadas: __ 50 mm, _ _ _ 100 mm e 200 mm
7 camadas: __ 50 mm; _ _ _ 100 mm e 200 mm

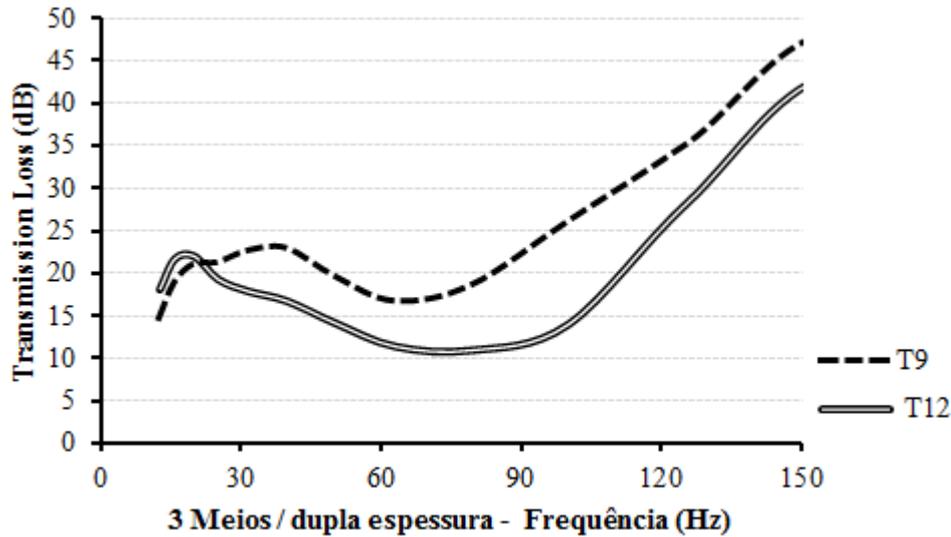
As diferentes larguras provocaram o deslocamento do mergulho de ressonância para frequências mais baixas. Disso decorre que o aumento da camada de ar melhora a TL na baixa frequência.

Apesar de não terem sido contempladas nesta pesquisa diferentes distâncias entre camadas de ar, os resultados em relação ao comportamento dos diversos tipos de painel, com e sem camada de ar, revelou características importantes quanto à perda de transmissão sonora em baixas e principalmente médias frequências. Em todas elas ocorreu distinção clara entre 3 e 5 meios para todos os tratamentos. As maiores densidades prevaleceram no intervalo de frequências até 150 Hz. Na média frequência, 500 a 4000 Hz, ocorreu inversão e os tratamentos com menor densidade superaram os de maior densidade em condição de 5 meios. Entre esses, os que receberam nanopartículas em suas faces se destacaram.

A importância da transferência de energia do ar para dentro da estrutura está diretamente relacionada a um bom absorvedor acústico. As características do material que promovam o maior gasto de energia sonora dentro dele, como tamanho, quantidade e distribuição de poros por exemplo, podem ser determinantes para uma boa absorção. Comparando dois materiais de mesma procedência, mesma densidade mas processos diferentes de obtenção como os painéis laboratoriais e industriais de bagaço de cana, verificam-se resultados diferentes para TL. As Figuras 90 e 91 apresentam a comparação de 4 tratamentos, T9 x T12 e T7 x T10, com painéis de bagaço de cana laboratoriais e industriais

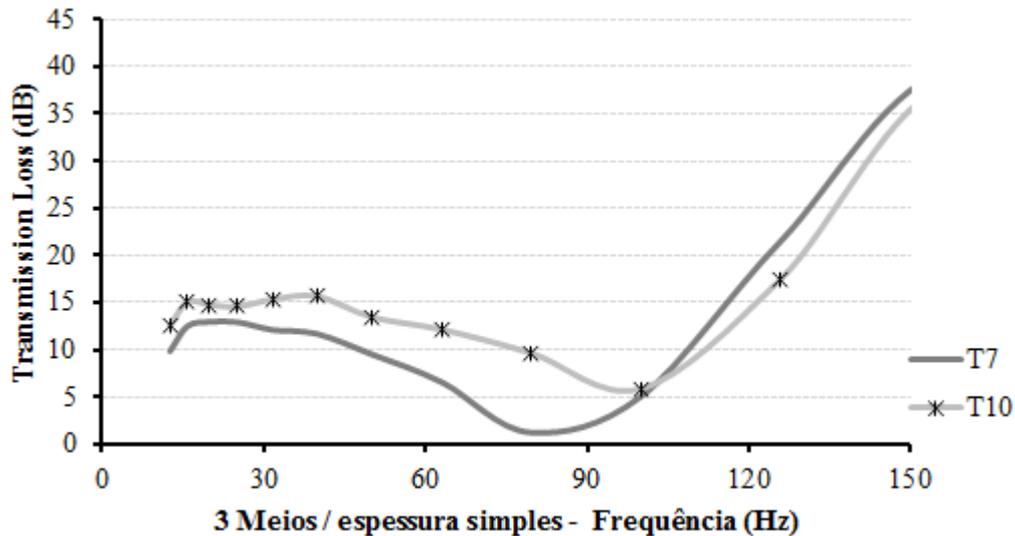
nas condições de dupla espessura e espessura simples respectivamente. O que se percebe é que na primeira figura, o painel laboratorial foi superior ao industrial. E na segunda figura, a resposta se inverteu.

Figura 90 - Painéis de cana – laboratório x industrial – dupla espessura.



Fonte: Da Autora (2017).

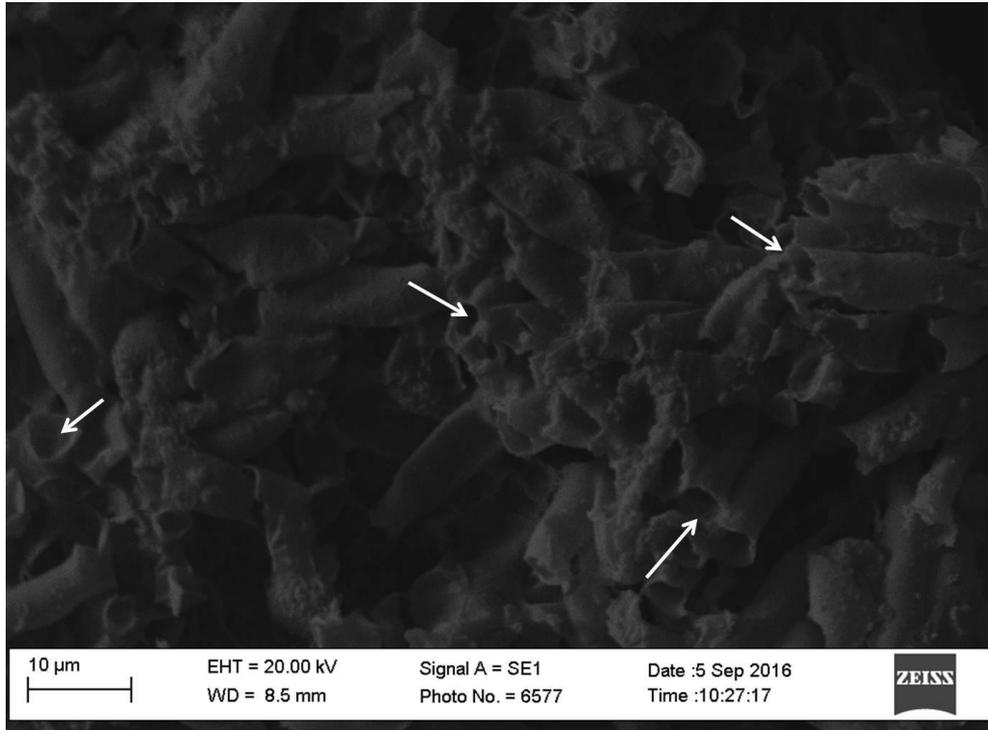
Figura 91 - Painéis de cana – laboratório x industrial – espessura simples.



Fonte: Da Autora (2017).

Analisando a estrutura de ambos, podemos ver que os painéis laboratoriais de cana possuem estrutura de células abertas, fibras intactas, Figura 92. E os painéis industriais de cana apresentam fibras colapsadas e apegadas entre si, Figura 93.

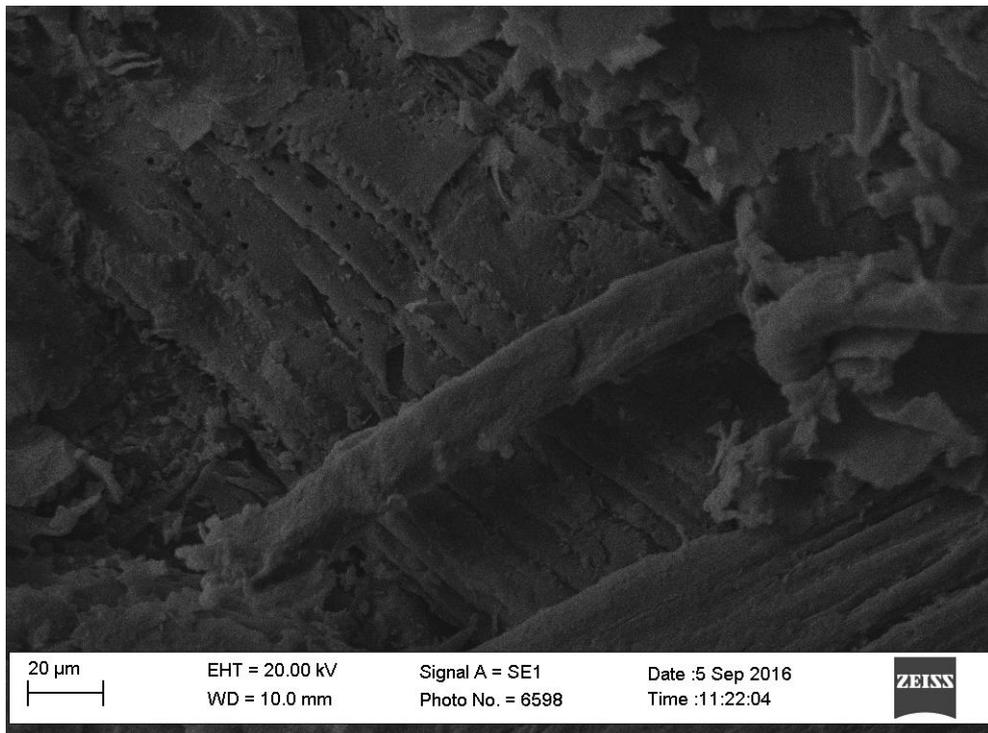
Figura 92 - Imagem obtida em MEV do painel de bagaço de cana de laboratório, $0,55 \text{ g/cm}^3$ com aumento de 800 x.



Fonte: Da Autora (2017).

Nota: As setas indicam as aberturas de fibras intactas dispostas de forma irregular na estrutura.

Figura 93 - Imagem obtida em MEV do painel de bagaço de cana industrial, $0,54 \text{ g/cm}^3$ com aumento de 1000x.



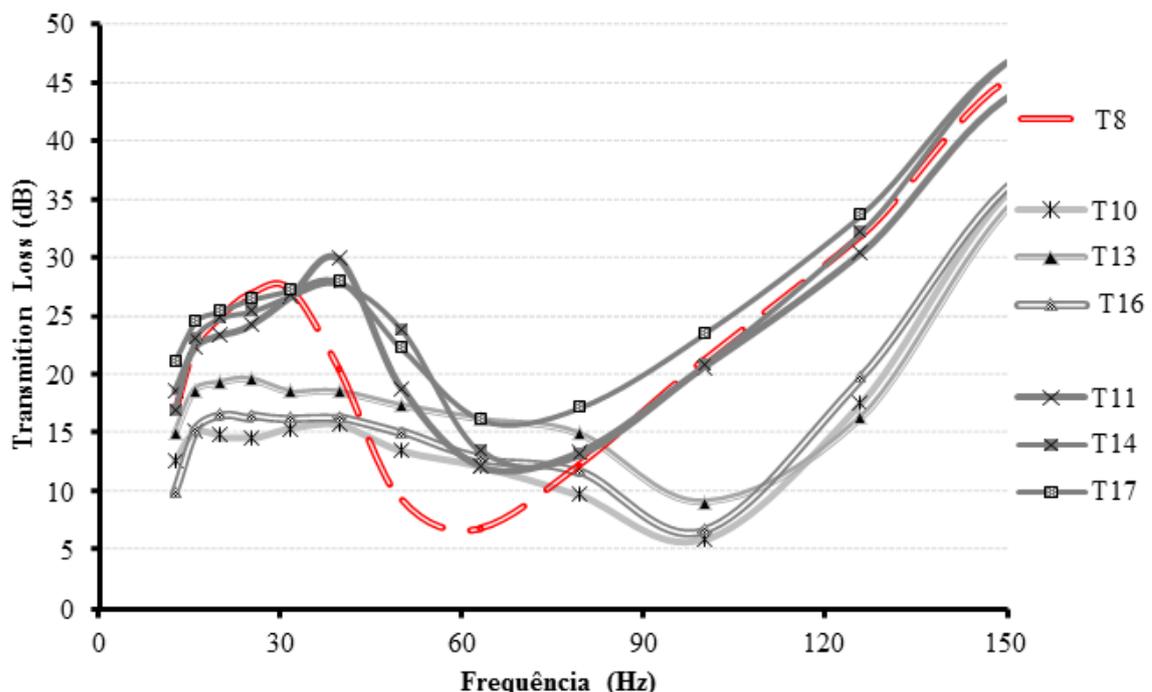
Fonte: Da Autora (2017).

Os feixes de células colapsadas, e unidas de maneira compacta podem ser observadas. A explicação para os maiores valores de TL dos painéis de laboratório com dupla espessura reside no fato de possuírem canais abertos, fibras ainda intactas, em sua estrutura que, quando duplicada, propiciou a permanência da onda sonora e o atrito viscoso com o ar por suas aberturas. Nos painéis industriais duplos, a onda foi provavelmente mais refletida do que penetrante, em razão da compacidade da superfície. Nos painéis simples (3 meios), essas aberturas ou poros por onde a onda passou não ofereceram resistência suficiente à passagem da onda, uma vez que com metade da espessura a estrutura de poros abertos não ofereceu massa suficiente para a permanência da onda dentro do painel por mais tempo.

7.5 Comparação entre painéis laboratoriais e industriais

Comparando os melhores resultados dos painéis de bagaço de cana feitos em laboratório e os resultados dos painéis industriais, observou-se que, no intervalo de 0 a 150 Hz, os painéis industriais sob o efeito de camada de ar foram superiores inclusive ao tratamento laboratorial que melhor respondeu a essa condição, T8, Figura 94.

Figura 94 - Painéis laboratoriais x industriais – camada de ar – 0 a 150 Hz.

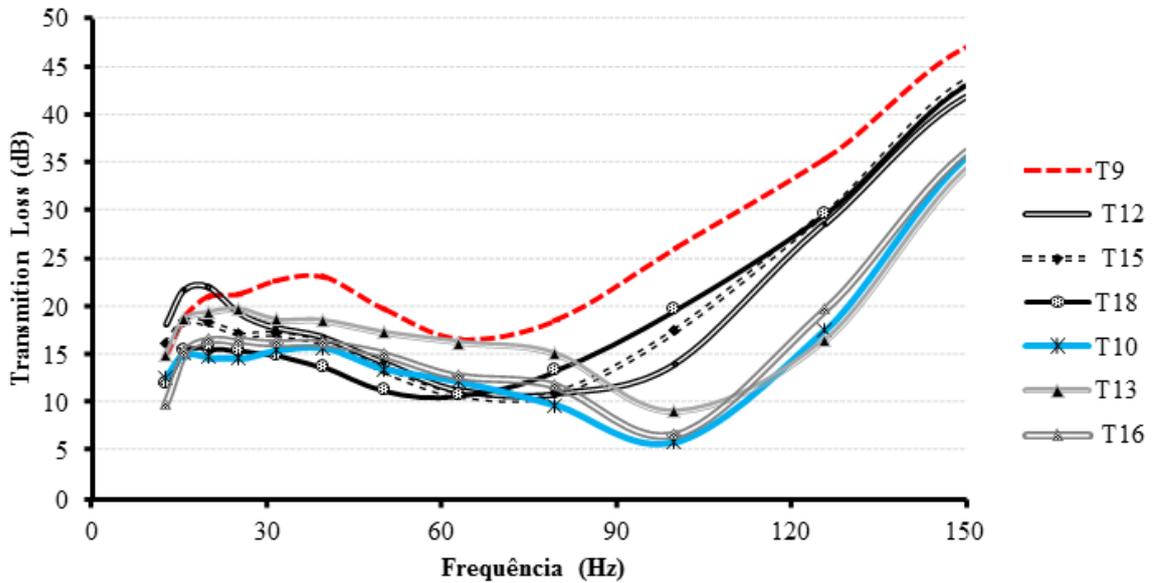


Fonte: Da Autora (2017).

Sob o efeito de dupla espessura, para o mesmo intervalo de 0 a 150 Hz, verificou-se a superioridade do painel laboratorial de cana com maior densidade, T9. É importante destacar

neste caso que, os painéis de bagaço de cana, tanto de laboratório (T9) quanto industrial (T10) obtiveram a melhor e pior respostas, respectivamente, Figura 95.

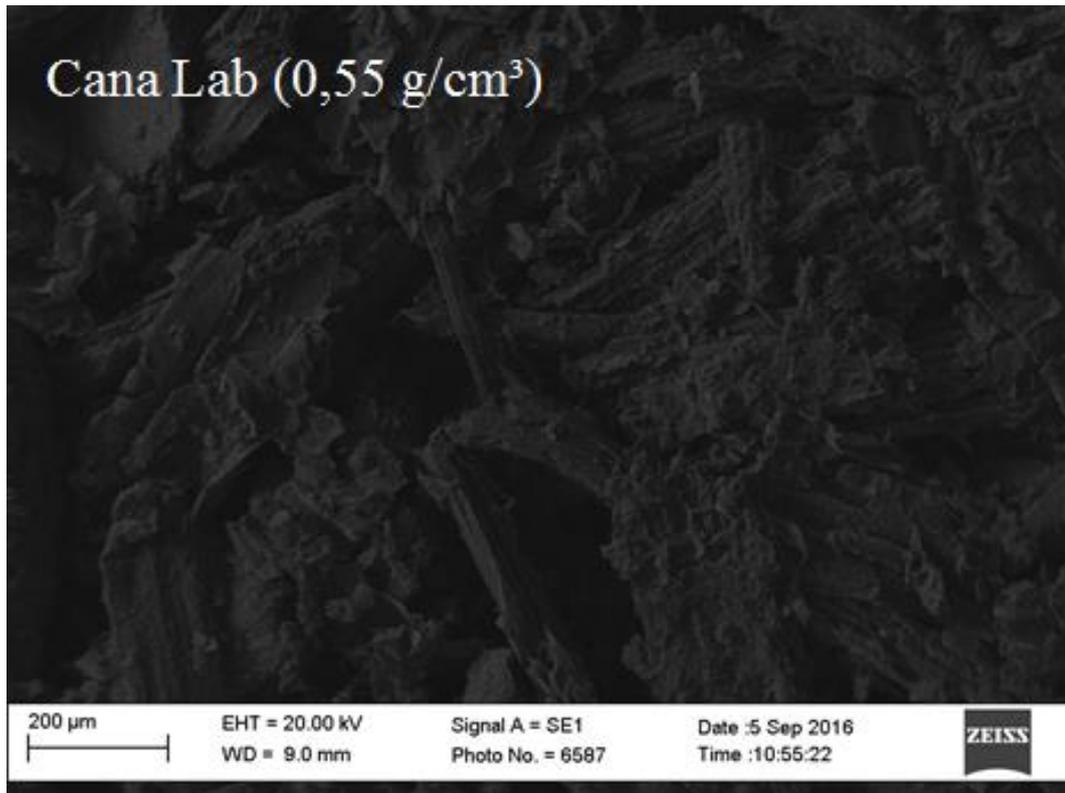
Figura 95 - Painéis laboratoriais x industriais – espessura – 0 a 150 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

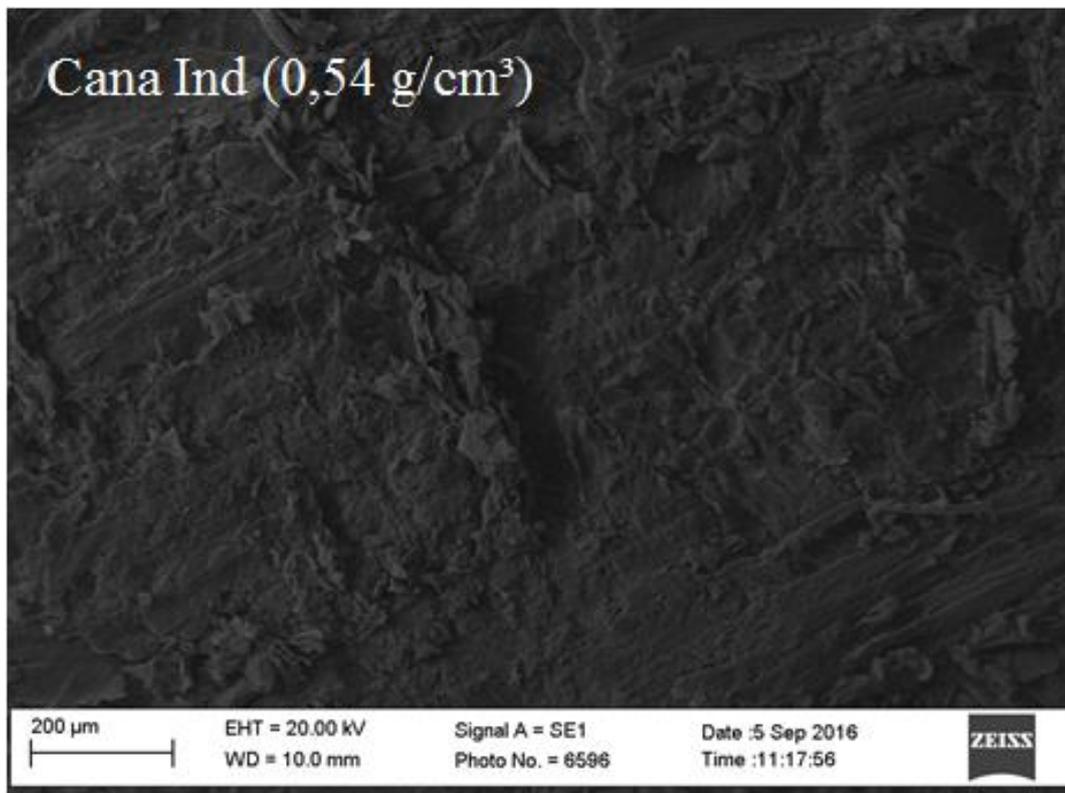
Considerando que ambos pertencem à mesma espécie e possuem densidades muito próximas (cana laboratorial, $0,55 \text{ g/cm}^3$ e cana industrial, $0,54 \text{ g/cm}^3$), pode-se explicar essa diferença na conformação do painel. O painel laboratorial possui protuberâncias nas faces, que o industrial não possui. Nesse caso, a condição morfológica diferenciada da superfície dos painéis proporcionou respostas opostas entre si. Isso indica que a onda sonora é sensível às irregularidades que possa encontrar em seu caminho. Nas Figuras 96 e 97, apresentam-se os dois tipos de painel.

Figura 96 - Painel laboratorial de cana – Imagem de MEV.



Fonte: Da Autora (2017).

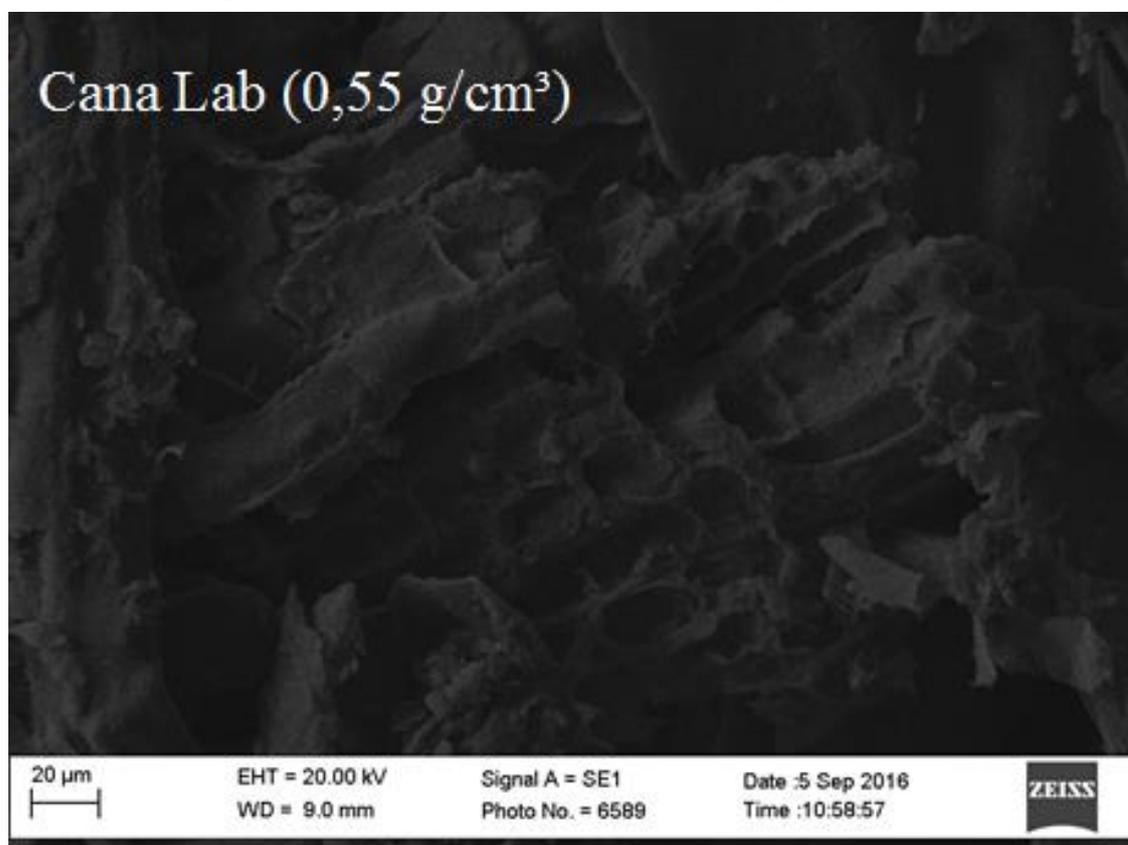
Figura 97 - Painel industrial de cana – Imagem de MEV.



Fonte: Da Autora (2017).

É possível observar nas imagens ampliadas, Figura 98, muitas fibras intactas com liberdade para vibração e passagem de ar, no painel laboratorial

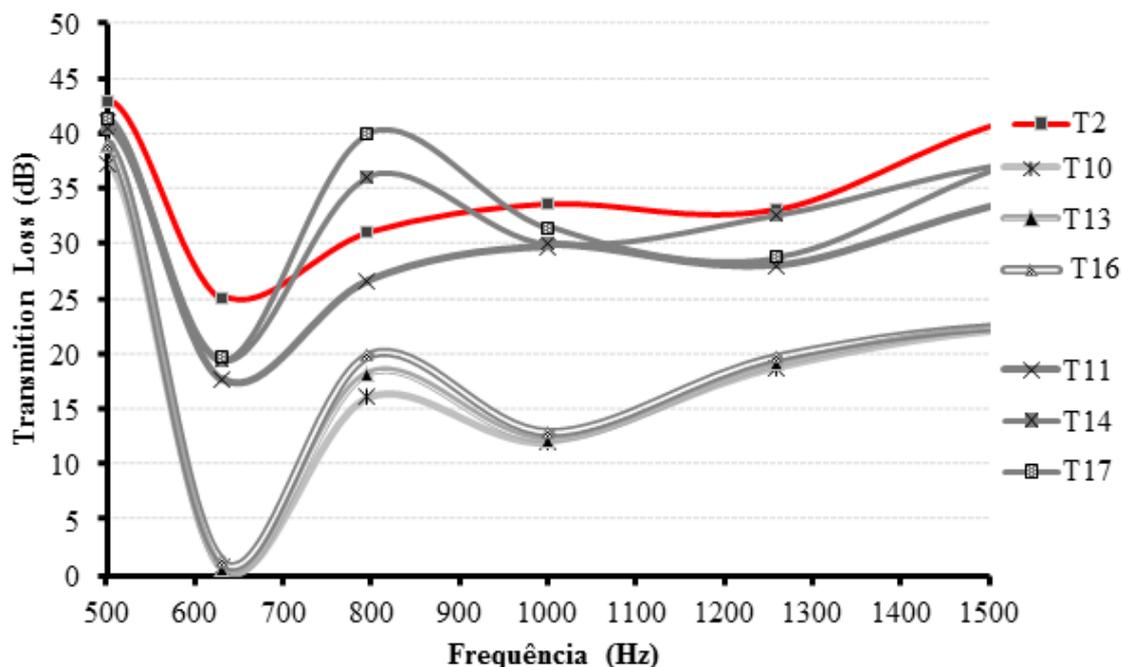
Figura 98 - Painel laboratorial de cana – Imagem de MEV.



Fonte: Da Autora (2017).

Na faixa de 500 a 1500 Hz, os painéis industriais de madeira, T17 (Eucalipto) e T14 (Pinus) apresentaram respostas superiores apenas entre 700 e 900 Hz e na condição de camada de ar, com picos de 53 e 40 dB respectivamente. Fora desse intervalo, o tratamento laboratorial de baixa densidade e nanopartículas, T2, foi superior aos demais, confirmando a relação entre camada de ar e nanopartículas em média frequência, Figura 99.

Figura 99 - Painéis laboratoriais x industriais – camada e ar – 500 a 1500 Hz.

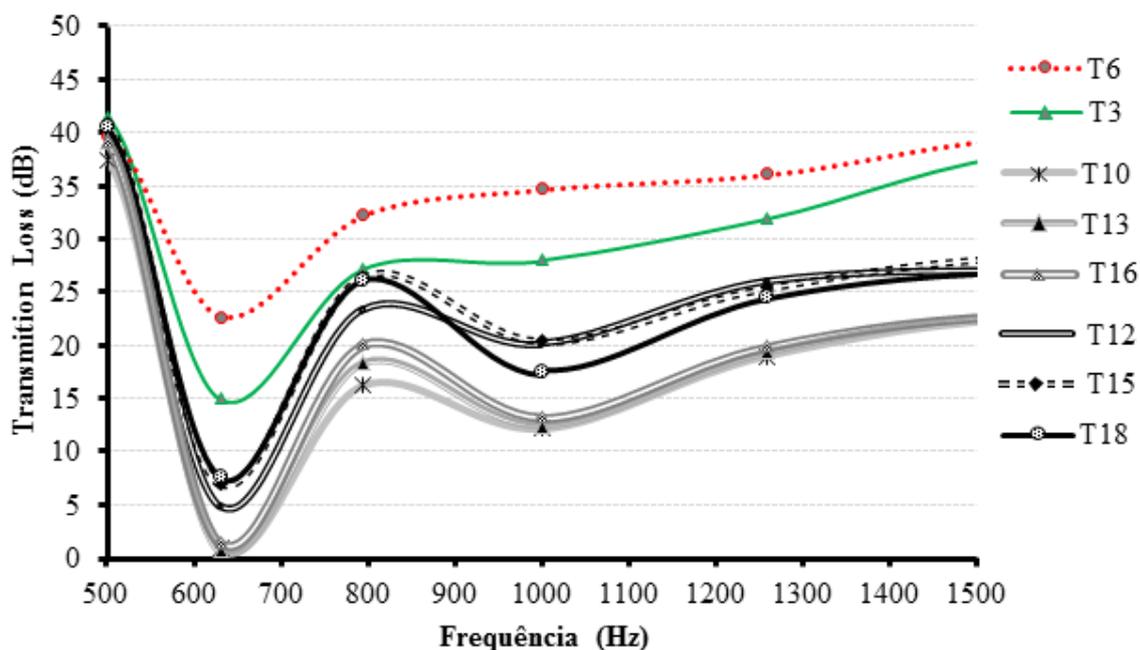


Fonte: Da Autora (2017).

Ressalta-se que, os tratamentos testemunha industriais T10, T13 e T16, apresentaram resultados inferiores aos que receberam os efeitos de camada de ar e dupla espessura; à semelhança dos laboratoriais.

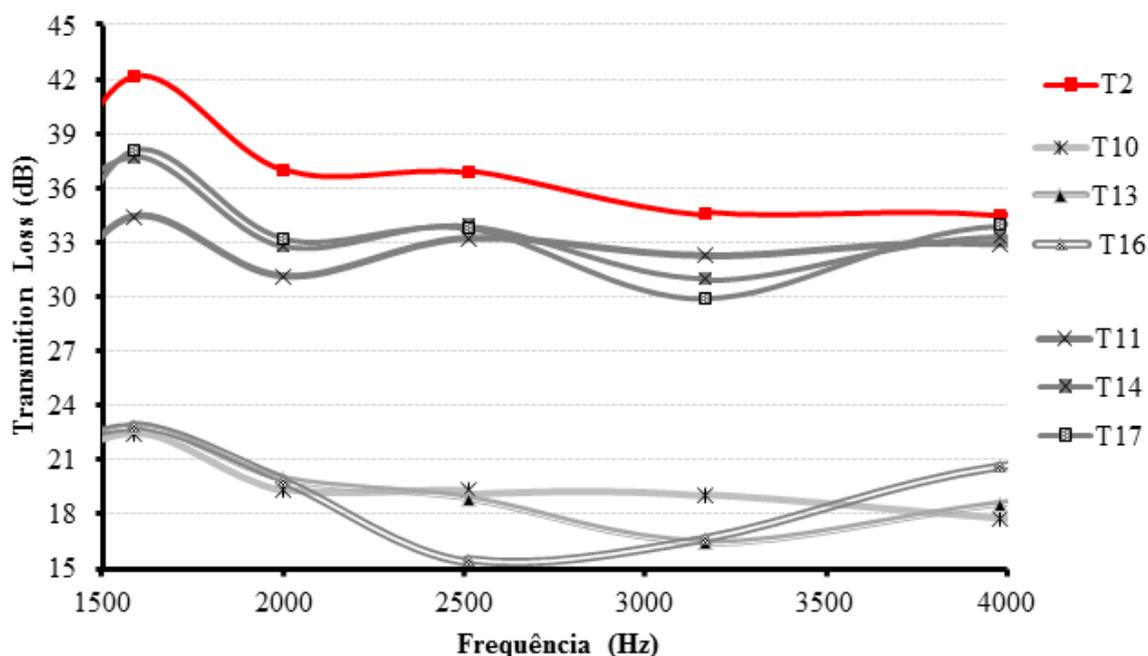
Na condição de dupla espessura, para o mesmo intervalo de frequência, não ocorreu tal pico das espécies de madeira. Os painéis laboratoriais responderam melhor que os industriais e entre os laboratoriais, T6 (sem nanopartículas) superou T3 (com nanopartículas), confirmando a interação dupla espessura e ausência de nanopartículas. Observou-se ainda que, os painéis com maior densidade, de T10 a T18, sofreram queda mais pronunciada na frequência crítica de 600 Hz do que os outros com menor densidade (T6 e T3), em decorrência de maior rigidez, Figura 100.

Figura 100 - Painéis laboratoriais x industriais – dupla espessura – 500 a 1500 Hz.

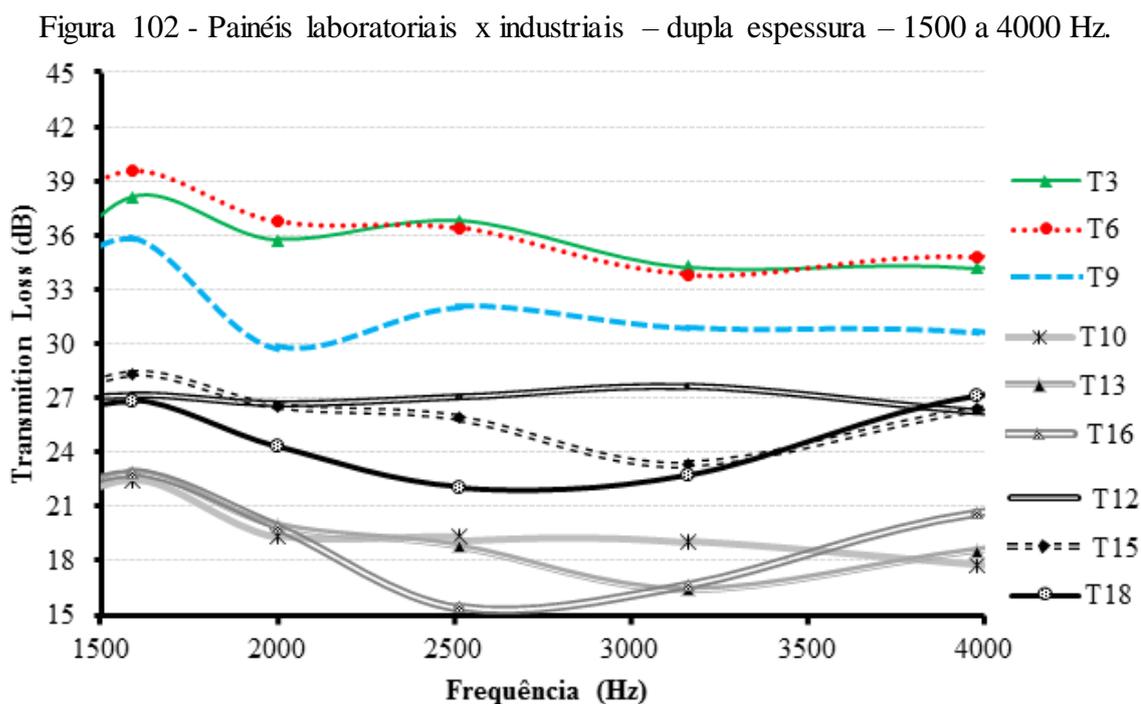


Ainda na média frequência, entre 1500 a 4000 Hz, observou-se melhora significativa nas respostas dos painéis industriais sujeitos à camada de ar em relação aos similares testemunha, na ordem de 15 dB. Porém, ainda neste intervalo, o painel laboratorial de baixa frequência com tratamento de nanopartícula nas faces (T2) obteve resultado superior aos demais, Figura 101.

Figura 101 - Painéis laboratoriais x industriais – camada de ar – 1500 a 4000 Hz.



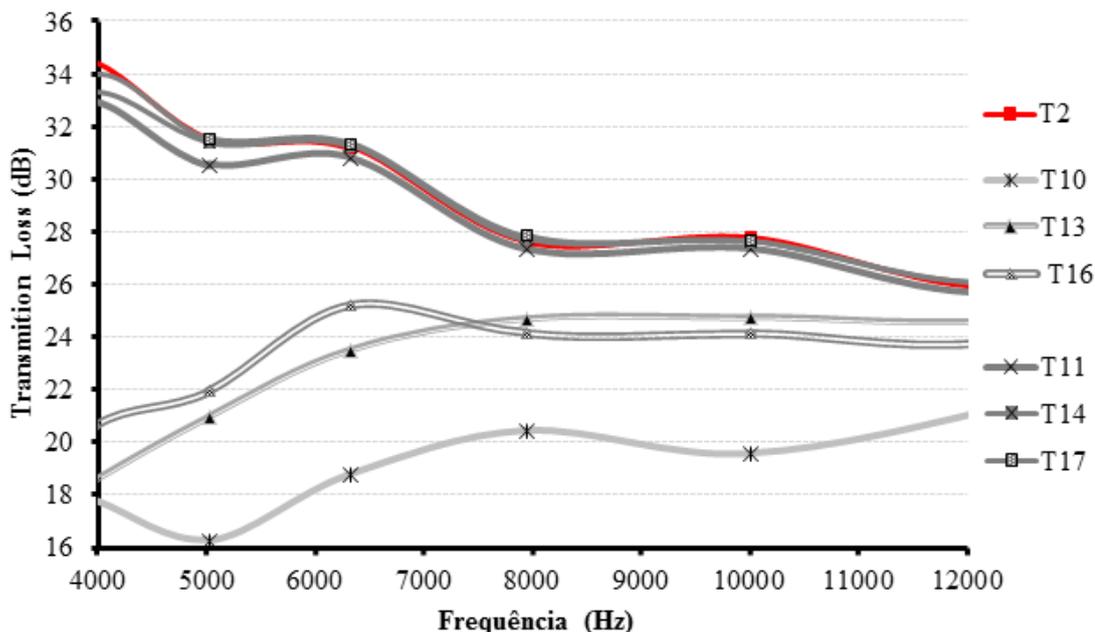
O efeito da camada de ar para os painéis industriais foi melhor do que o efeito de dupla espessura. No primeiro caso, superaram a marca de 30 dB e com dupla espessura não atingiram esse valor. Nessa faixa de frequência, o efeito da dupla espessura foi destacadamente melhor para os painéis laboratoriais e entre esses, os de menor densidade, T3, T6 e T9. Verificou-se ainda que no intervalo e 2.000 a 4.000 Hz, os painéis industriais de cana (T10 e T12) superaram os de madeira (T13, T16 e T15, T18), Figura 102.



Fonte: Da Autora (2017).

E, finalmente, na alta frequência, o efeito da camada de ar provocou aproximação entre os tratamentos; fato que não se verificou para os similares testemunha que apresentaram clara distinção, em torno de 4 dB, entre as espécies de madeira (T13 e T16) e a espécie de cana (T10), Figura 103.

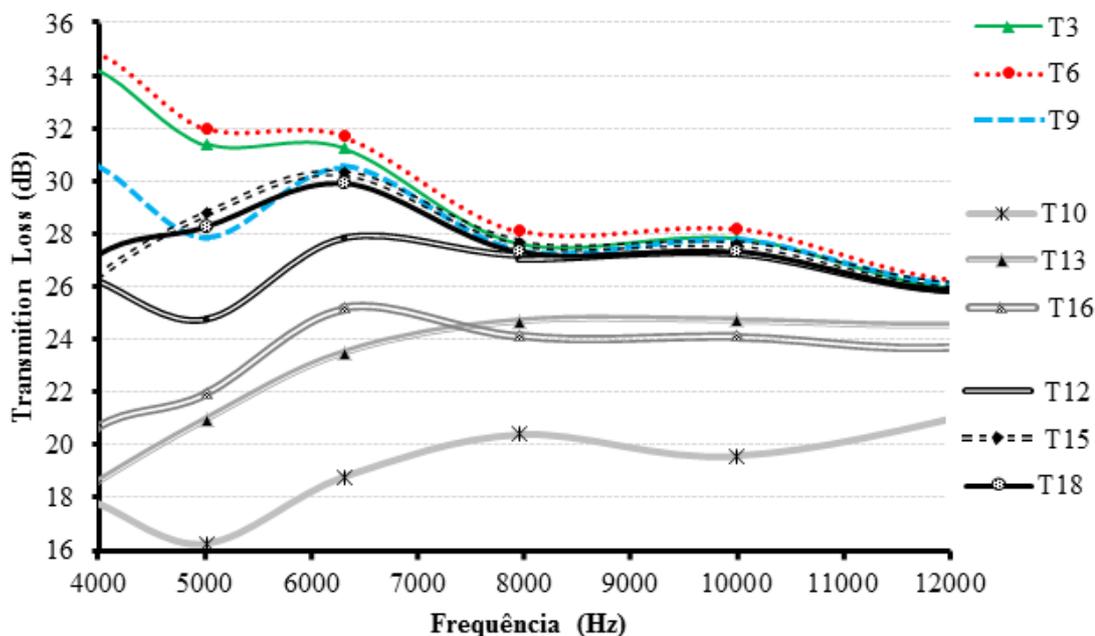
Figura 103 - Painéis laboratoriais x industriais – camada de ar – 4.000 a 12.000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

Quando testados com dupla espessura, os painéis industriais diferenciaram entre si até 8.000 Hz e dos laboratoriais de baixa frequência até 6.000 Hz, entre 6 a 2 dB. Comparados com os painéis laboratoriais, a tendência de aproximação em alta frequência dos painéis industriais se verificou para os dois efeitos propostos, porém com maior eficácia testados com camada de ar, Figura 104.

Figura 104 - Painéis laboratoriais x industriais – dupla espessura – 4.000 a 12.000 Hz.



Fonte: Da Autora (2017).

8 CONCLUSÕES

O delineamento experimental visou a obter novos parâmetros de comportamento dos painéis de fibra natural em face à performance acústica de perda de transmissão sonora em ambientes reverberantes. Diante disso, a metodologia de ensaio e construção das minicâmaras reverberantes, tendo como aspecto inovador serem construídas em vidro temperado, atendeu às condições de teste especificadas pelas normas. Corrobora esse fato a correspondência entre os resultados empíricos obtidos na pesquisa e os relatados pela literatura no que se refere à faixa de valores próximos obtidos.

Os efeitos de camada de ar e dupla espessura contribuíram para o aumento significativo de TL. Em baixa frequência e dupla espessura, os painéis de bagaço de cana de densidade menor superaram os de Pinus e Eucalipto. Nas faixas de média e alta frequência, os painéis de baixa densidade e nanoprtículas com camada de ar apresentaram os melhores resultados, indicando forte relação entre camada de ar e presença de nanoprtículas, superando os tratamentos com dupla espessura até 3.500 Hz. A partir dessa frequência, foram superados pelos painéis sem nanoprtículas de baixa frequência, tanto com camada de ar como com dupla espessura que se mantiveram superiores em todo o intervalo de alta frequência.

A combinação camada de ar, baixa densidade e nanoprtículas em média frequência apresentou as melhores médias. Ainda em média frequência, ocorreu a maior diferenciação entre os tratamentos na condição de dupla espessura.

Na alta frequência, os tratamentos sujeitos aos efeitos de camada de ar e dupla espessura apresentaram valores superiores à testemunha, porém com muito pouca diferenciação entre si e tendência à aproximação.

Os painéis de madeira não apresentaram diferença significativa entre as duas espécies, mas apresentaram maior relação com espessura na baixa frequência e com camada de ar na média frequência; porém, acima de 500 Hz foram totalmente superados pelos painéis de bagaço, tanto de baixa como de alta densidades.

Constatou-se o deslocamento do mergulho de coincidência para frequências críticas na faixa de baixa frequência, sob o efeito de camada de ar e dupla espessura, conforme relatado pela literatura.

Verificou-se que no intervalo de 150 a 500 Hz, nenhum dos efeitos foram satisfatórios para aumento de TL. Houve grande aproximação entre os tratamentos com mergulhos de coincidência próximos a 300 Hz. Decorre desse fato que não foram incluídos, na discussão

dos resultados, os gráficos referentes a esse intervalo de frequência, por não conterem respostas significativamente distintas entre si.

Os resultados mostraram que o bagaço de cana pode ser um material adequado para cumprir a função de perda de transmissão sonora em ambientes reverberantes.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa do material homogêneo, feito primariamente de bagaço de cana-de-açúcar, sem acréscimos de outros componentes que o definiriam como um compósito, é interessante e pertinente, porque se torna passível de ser aplicável como parâmetro de comportamento intrínseco do material. Porém, há que se implementar alternativas híbridas, a fim de se obter produtos mais leves, duráveis e acusticamente melhorados. Materiais compósitos são cada vez mais utilizados pelas indústrias e trazem consigo, além do aproveitamento sustentável e racional de recursos descartáveis, a busca tecnológica de alta performance em resposta a questões cada vez mais especializadas.

Diante disso e de resultados positivos que o material em estudo apresentou quanto à perda de transmissão sonora, sugere-se a implementação de novas propostas como simulações em ambientes reais para a comparação com os resultados obtidos. Outro aspecto interessante seria a introdução de espaços vazios dentro do painel e também fora dele como reentrâncias por exemplo, multicamadas de nano partículas em diferentes configurações de aplicação, além de outras simulações com diferentes combinações de espessura e camadas de ar.

A ineficácia dos tratamentos na faixa de 150 a 500 Hz sugere a necessidade de pesquisas que investiguem associação com outros materiais que possam melhorar a atenuação em baixas frequências. Sugere-se a investigação de painéis acústicos setorizados por bandas de frequência, embasada nos estudos de frequências ressonantes, a fim de estabelecer padrões visuais específicos por painel, uma vez que não apenas o tipo de material, mas a forma como ele está disposto em sua superfície influencia diretamente no tipo de resposta. Uma possibilidade seria a aplicação setorizada de incrementos como nanopartículas, que apresentaram boas respostas quando sujeitas à média frequência em painéis de cana de baixa densidade. Essas são algumas propostas para apreciação de futuras pesquisas que possibilitariam a construção de painéis acústicos inteligentes de alta performance.

REFERÊNCIAS

- AGNIHOTRI, S.; DUTT, D.; TYAGI, C. H. Complete characterization of bagasse of early species of *saccharum officinerum*-co 89003 for pulp and paper making. **BioResources**, Oxford, v. 5, p. 1197-1214, 2010.
- ASO, S.; KINOSHITA, R. Absorption of sound wave by fabrics: part 1, absorption mechanism. **Journal of the Textile Machinery Society of Japan**, Tokyo, v. 9, n. 1, p. 32-39, 1963a.
- ASO, S.; KINOSHITA, R. Absorption of sound wave by fabrics: part 2, acoustic impedance, density. **Journal of the Textile Machinery Society of Japan**, Tokyo, v. 9, n. 1, p. 40-46, 1963b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**: avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade: procedimento. Rio de Janeiro, 2003a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179**: edificações habitacionais: desempenho, parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho, parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2003b.
- BIDLACK, J.; MALONE, M.; BENSON, R. Molecular structure and component integration of secondary cell wall in plants. **Proceedings of the Oklahoma Academy of Science**, Oklahoma City, v. 72, p. 51-56, 1992.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. São Paulo: E. Blücher, 2006.
- BONGESTABS, D. H. **Comportamento espacial do som: módulo 4: conforto ambiental III**. Curitiba: Ed. UFPR, 2006. Apostila.
- BRASIL ESCOLA. **Reflexão especular e difusa**. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/reflexao-especular-difusa.htm>>. Acesso em: 10 mar. 2017.
- CARVALHO, S. T. M. et al. Thermal properties of chipboard panels made of sugar cane bagasse (*Saccharum officinarum* L.). **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 5, p. 1183-1189, Oct. 2013.
- COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application**. Melville: Acoustical Society of America, 2005.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html2015>. Acesso em: 11 maio 2015.

EKICI, B.; KENTLI, A.; KÜÇÜK, H. Improving sound absorption property of polyurethane foams by adding tea-leaf fibers. **Archives of Acoustics**, Warszawa, v. 37, n. 4, p. 515-520, 2012.

EPOCH TIMES. Disponível em: <<http://www.epochtimes.com.br>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

ERSOY, S.; KÜÇÜK, H. Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material for its sound absorption properties. **Applied Acoustics**, Barking, v. 70, n. 1, p. 215-220, 2009.

ESTÚDIO DIGITAL. **Som analógico e som digital**. Disponível em: <<http://faestudiodigital.blogspot.com.br>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. **Master handbook of acoustics**. 5th ed. New York: The McGraw-Hill, 2009.

FAUSTINO, J. et al. Impact sound insulation technique using corn cob particleboard. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 37, p. 153-159, Dec. 2012.

FECHINE, J. M. A transformada de Fourier e suas aplicações. In: CICLOS DE SEMINÁRIOS TÉCNICOS, 2010, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: UFCG, 2010. 1 CD-ROM.

FELDMAN, A. S.; GRIMES, C. T. **Hearing conservation in industry**. Baltimore: The Williams & Wilkins, 1985.

FERNANDES, J. C. **Acústica e ruídos**. Baurú: Ed. UNESP, 2002. Apostila. Disponível em: <http://resgatebrasilvirtual.com.br/moodle/file.php/1/E-book/Materiais_para_Download/Ruido/Apostila%20de%20Ruido%20I.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2017.

FLETCHER, H. **Speech and hearing in communication**. 2nd ed. Oxford: D. V. Nostrand, 1953. 461 p.

FRANKLIN, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, London, v. 155, n. 3924, p. 51, 1945.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. Florianópolis: Ed. UFSC, 1992. 660 p.

HEMMASI, A. H. et al. Study of morphological and chemical composition of fibers from Iranian sugarcane bagasse. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science**, Dubai, v. 11, n. 4, p. 478-481, 2011.

HUBBARD, A. T. **Encyclopedia of surface and colloid science**. New York: CRC, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estatística da produção agrícola**: setembro de 2013. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr_201309.pdf>. Acesso em: 10 maio 2015.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Resíduos agropecuários: cana-de-açúcar é a cultura que mais produz resíduos no Brasil.** Disponível em: <<http://www.canalrural.com.br/noticias/agricultura/residuos-agropecuarios-cana-de-acucar-cultura-que-mais-produz-residuos-brasil-38488>>. Acesso em: 11 maio 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140:** acoustics: measurement of sound insulation in buildings and buildings elements. Geneva, 1999a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 354:** acoustics - measurement of sound absorption in reverberation rooms. Geneva, 1999b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3741:** acoustics: determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure: precision methods for reverberation test rooms. Geneva, 2010.

JOSSE, R. **La acústica em la construcción.** Barcelona: G. Gili, 1975. 242 p.

KALINASARI, L. et al. Acoustical properties of particleboards made from betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. **BioResources**, Oxford, v. 7, n. 4, p. 5700-5709, 2012.

KOIZUMI, T.; TSUJIUCHI, N.; ADACHI, A. The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. **Structures and Composites**, London, v. 59, p. 157-166, 2002.

KUCZMARSKI, M. A.; JOHNSTON, J. C. **Acoustic absorption in porous materials.** Cleveland: Glenn Research Center, 2011.

LIDE, D. R. **CRC - Handbook of Chemistry and Physics.** 81st ed. New York: CRC, 2000.

LJUNGGREN, S. Airborne sound insulation in thin walls. **Journal of Acoustical Society of America**, Melville, v. 89, n. 5, p. 2324-2337, 1991.

MACHADO, N. **Aulas de física e química.** Disponível em: <<http://www.aulas-fisica-quimica.com>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

MAMTAZ, H. et al. Acoustic absorption of natural fiber composites. **Journal of Engineering**, London, v. 2016, p. 1-11, 2016.

MÉNDEZ, A. M. **Acústica arquitectonica.** Buenos Aires: Universidad del Museo Social Argentino, 1994. 238 p.

MERLUZZI, F. Patologia da rumore. In: SARTORELLI, E. (Ed.). **Trattato di medicina del lavoro.** Pádua: Piccin, 1981. v. 2, p. 1119-1149.

MET@LICA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Desempenho acústico em sistemas drywall.** Disponível em: <<http://wwwo.metalica.com.br/desempenho-acusticos-em-sistemas-drywall>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

MICHAUSKI, R. L. X. N. **AUT 0278**: desempenho acústico, arquitetura e urbanismo: transmissão sonora e acústica de edificações. São Paulo: EDUSP, 2015. Disponível em: <<https://doc.go.org/07-transmissao-sonora-e-acustica-de-edificacoes>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

MIRMEHDI, S. **Paper packaging improvement using corona discharge and spray coating of cellulose nanofibrils and nanoclay**. 2016. 90 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

NORONHA, E. H.; TRAVAGLIA FILHO, U. J.; GARAVELLI, S. L. Quantificação dos níveis de ruídos num estande de tiros da PM do Distrito Federal. **Humanitates**, São Paulo, v. 1, n. 3, jun. 2005. Disponível em: <<http://www.humanitates.ucb.br/3/ruído.htm>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

OLIVEIRA, E. P.; MOTTA JUNIOR, W. S. Um modelo simplificado para ondas sonoras complexas. In: CONGRESSO DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL DA REGIÃO SUDESTE, 1., 2009, Vitória. **Anais...** Vitória: CMAC Sudeste, 2009.1 CD-ROM.

PATURAU, J. M. **By-products of the cane sugar industry**: an introduction to their industrial utilization. 3rd ed. New York: Elsevier, 1989. 435 p. (Sugar Series).

PEREIRA, P. H. F. et al. **Vegetal fibers in polymeric composites**: a review. Fortaleza: EMBRAPA Agroindústria Tropical, 2015.

POLITO, T.; MARULO, F. Sound transmission loss of composite panels. In: **PROBABILISTIC ANALYSIS AND EXPERIMENTAL RESULTS**, 2010, Naples. **Proceedings...** Naples: University of Naples "Federico II", 2010. p. 4631-4642.

PUTRA, A. et al. **Normal incidence of sound transmission loss of a double-leaf partition inserted with a microperforated panel**. Cairo: Hindawi, 2013. 8 p.

RANDALL, R. H. **An introduction to acoustics**. Mineola: Dover, 2005.

RUSSO, I. C. P. et al. Encaminhamentos sobre a classificação do grau de perda auditiva em nossa realidade. **Revista Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 287-288, 2009.

SAMARIHA, A.; KHAKIFIROOZ, A. Application of NSSC pulping to sugar cane bagasse. **BioResources**, Oxford, v. 6, n. 3, p. 3313-3323, 2011.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 30, n. 3, p. 507-512, Sept. 1974.

SIMÕES, F. M. **Acústica arquitetônica**. Rio de Janeiro: Eletrobras Procel, 2011.

SIMÕES, S. C. D. **Ruído e vibrações no corpo humano**: avaliação de ruído e vibrações. Setúbal: Lauak Portuguesa, 2014.

SMARDZEWSKI, J. et al. Sound absorption of wood-based materials. **Applied Acoustics**, Barking, v. 48, n. 4, p. 339-356, Aug. 1996.

SMITH, S. W. **The scientist and engineer's guide to digital signal processing**. San Diego: California Technical, 1997.

STROBEL, J.; WIGLEY, E.; EVANS, N. Acoustical engineering methodologies to measure student engagement. In: RESEARCH IN ENGINEERING EDUCATION SYMPOSIUM, 2009, Palm Cove. **Proceedings...** Palm Cove, 2009. 1 CD-ROM.

TOUTONGE, J. A. **Projeto e construção de câmaras reverberantes de escala reduzida para o estudo das características de perda de transmissão de divisórias confeccionadas a partir de materiais regionais**. 2006. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

ULLMANN, M. A. **Isolamento e visualização por afm de microfibras nanoestruturadas do bagaço processado de *Saccharum officinarum* L.:** relatório técnico científico. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010.

WASSILIEFF, C. Sound absorption of wood-based materials. **Applied Acoustics**, Barking, v. 48, n. 4, p. 339-356, 1996.

XIANG, H. et al. Investigation on sound absorption properties of kapok fibers. **Chinese Journal of Polymer Science**, Beijing, v. 31, p. 521-529, Mar. 2013.

YANG, H. S.; KIM, D. J.; KIM, H. J. Rice straw-wood particle for sound absorbing wooden construction materials. **Bioresource Technology**, Essex, v. 86, p. 117-121, 2003.

YANG, W.; LI, Y. Sound absorption performance of natural fibers and their composites. **Science China: Technological Sciences**, Beijing, v. 55, n. 8, p. 2278-2283, Aug. 2012.

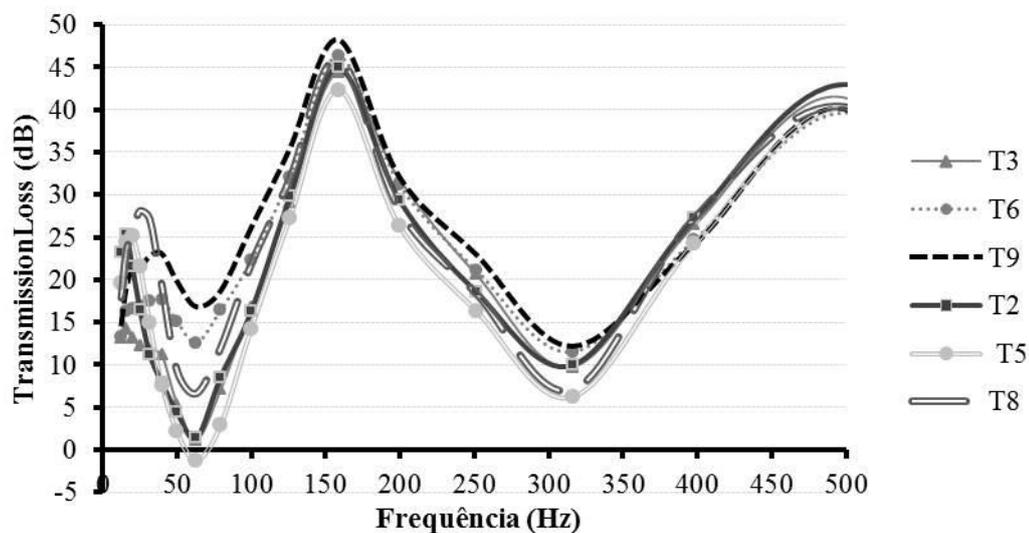
ZULKIFLI, R.; ZULKARNAIN, M. J. M. Noise control using coconut coir fiber sound absorber with porous layer backing and perforated panel. **American Journal of Applied Sciences**, New York, v. 7, p. 260-264, 2010.

APÊNDICE A – Valores de *Transmission loss* em função da frequência para os 18 tratamentos

Frequência	TL / T1	TL / T2	TL / T3	TL / T4	TL / T5	TL / T6	TL / T7	TL / T8	TL / T9	TL / T10	TL / T11	TL / T12	TL / T13	TL / T14	TL / T15	TL / T16	TL / T17	TL / T18
Level (dB)																		
12,58925	8,9025	23,19	13,1175	4,4675	19,5425	13,255	9,8625	16,74	14,8325	12,58	18,58333	18,0675	14,9325	16,93	16,05	9,84	21,0975	12,025
15,84893	10,4275	25,2725	14,135	7,485	24,385	16,28	12,51	22,36667	19,0325	15,0725	22,25333	21,695	18,6275	23,0125	18,4325	15,2075	24,53	15,36
19,95262	10,0325	21,585	13,105	7,9375	25,1275	16,56	12,9525	24,85	21,1875	14,7675	23,36667	21,9975	19,37	24,85	18,36	16,6775	25,4775	15,8525
25,11886	9,2	16,4975	12,175	7,8175	21,57	16,9425	12,93	26,93333	21,395	14,5725	24,23	19,265	19,635	25,48	17,105	16,505	26,5475	15,46
31,62278	9,4325	11,2575	11,795	7,1775	14,9325	17,455	12,11	27,35	22,775	15,3375	26,60333	17,8625	18,585	26,735	17,0775	16,3375	27,235	14,865
39,81072	6,42	4,4	5,405	4,6125	7,6425	17,715	11,69	20,44667	23,065	15,6725	29,87	16,7325	18,525	27,78	16,2825	16,275	27,9825	13,77
50,11872	6,42	4,4	5,405	4,6125	2,1175	15,0525	9,505	9,306667	19,78	13,445	18,78	14,145	17,3175	23,8025	13,42	15,0375	22,3575	11,2575
63,09573	0,565	1,4075	1,195	0,73	-1,26	12,6075	6,535	6,85	16,83	12,125	12,10667	11,3625	16,17	13,4925	10,84	12,865	16,1425	10,86
79,43282	-2,525	8,5625	7,1025	-4,8575	2,9125	16,46	1,245	12,29333	18,725	9,685	13,38	10,9375	15,0125	13,12	10,955	11,8475	17,245	13,3025
100	7,86	16,275	16,7775	2,135	14,275	22,3025	5,1	21,26333	26,18	5,895	20,58	13,96	9,05	20,84	17,42	6,735	23,545	19,625
125,8925	22,57	29,7475	29,1275	18,4225	27,2275	32,0675	21,525	31,94	35,43	17,51	30,35	28,4925	16,38	32,195	29,5975	19,745	33,73	29,57
158,4893	39,4025	44,9275	44,3625	35,9225	42,31	46,28	39,705	46,46667	48,2325	38,3725	45,07333	43,315	37,2525	48,3325	45,075	38,6725	48,085	44,65
199,5262	29,0425	29,395	31,815	24,6525	26,3275	31,2325	26,2625	28,15333	32,11	25,9525	27,88	29,04	26,665	29,1375	28,5175	26,275	28,7975	28,175
251,1886	17,8575	18,5975	20,6475	16,9275	16,375	21,1725	19,855	18,28667	22,99	18,585	16,40667	23,0975	19,05	18,4525	22,535	19,3525	18,295	21,595
316,2278	5,98	9,9725	9,77	2,285	6,2275	11,5225	7,205	7,213333	12,195	6,83	8,706667	8,6125	6,21	8,0775	10,995	6,78	9,62	10,075
398,1072	23,32	27,2	26,44	17,3275	24,24	24,7175	17,385	27,21667	24,185	16,5725	27,69667	21,33	15,9825	28,4175	23,7125	18,945	28,5525	23,4975
501,1872	37,9675	42,96	41,3275	34,8025	40,2875	39,63	37,8125	40,08333	39,99	37,315	41,05667	40,0575	38,9875	40,635	40,88	39,105	41,4825	40,5125
630,9573	8,1025	25,225	14,8775	5,2325	22,925	22,585	-0,2625	19,32333	13,6125	0,8175	17,88333	4,925	0,65	19,4525	6,885	1,3575	19,7825	7,4975
794,3282	18,5475	31,1975	27,085	15,435	26,555	32,2475	17,1175	28,87667	28,4375	16,1925	26,79333	23,2775	18,305	36,175	26,415	20,025	40,14	26,0975
1000	16,0975	33,6825	27,94	12,295	31,0025	34,6825	12,1	29,81667	26,415	12,125	29,87667	20,195	12,3575	30,135	20,3475	13,1025	31,58	17,395
1258,925	21,365	33,29	31,775	17,8475	30,7	36,0775	19,2225	28,82333	31,5275	18,87	28,13	25,9925	19,2825	32,635	25,3875	19,905	28,87	24,4425
1584,893	25,875	42,19	38,1525	22,1825	38,495	39,59	21,5925	38,11	35,8225	22,445	34,43333	27,135	22,855	37,7525	28,3675	22,8475	38,1225	26,8575
1995,262	26,3125	37,01	35,725	23,1175	33,61	36,7675	20,4425	32,9	29,7375	19,35	31,14333	26,6875	19,9725	32,8475	26,54	19,8325	33,175	24,355
2511,886	25,565	36,9025	36,8075	25,45	36,035	36,4175	21,0225	34,45	32,0275	19,295	33,18	27,04	18,8175	33,965	25,9025	15,4475	33,7875	22,0325
3162,278	27,805	34,615	34,27	26,6675	34,025	33,795	21,645	32,02333	30,8725	19,085	32,32	27,6675	16,42	31,065	23,315	16,6875	29,965	22,74
3981,072	29,865	34,4875	34,1975	27,6325	34,915	34,8225	21,02	33,55333	30,6475	17,7875	32,91667	26,2525	18,5575	33,3125	26,38	20,64	33,965	27,135
5011,872	29,065	31,555	31,3825	27,4175	32,05	31,9775	18,675	30,76667	27,8975	16,24	30,54	24,77	20,945	31,3825	28,78	21,9525	31,55	28,275
6309,573	29,2375	31,205	31,25	27,2025	31,8325	31,7225	22,39	30,71333	30,5475	18,7625	30,82667	27,8525	23,515	31,265	30,325	25,195	31,365	29,9425
7943,282	26,52	27,6425	27,6375	25,5925	28,2375	28,1175	23,8275	27,12	27,3375	20,4025	27,35333	27,1375	24,6875	27,75	27,6675	24,13	27,8475	27,315
10000	26,005	27,8325	27,8075	24,45	28,23	28,19	24,6775	27,36333	27,755	19,585	27,37667	27,2525	24,7325	27,6175	27,6075	24,1325	27,6775	27,34
12589,25	23,3825	25,9825	25,9925	22,445	26,445	26,3325	25,155	26,03	26,17	21,535	25,79667	25,9725	24,66	26,135	26,14	24,0275	26,1825	25,9125
15848,93	26,9875	30,6275	30,6575	25,265	31,12	31,0575	27,305	30,55333	30,9375	24,9725	30,74333	30,7575	26,645	30,885	30,81	28,4975	30,8575	30,735
19952,62	24,0125	24,5525	24,555	23,2525	25,015	24,9825	23,4225	24,75	24,8525	23,5575	24,78667	24,7775	23,955	24,8125	24,7975	23,78	24,775	24,68

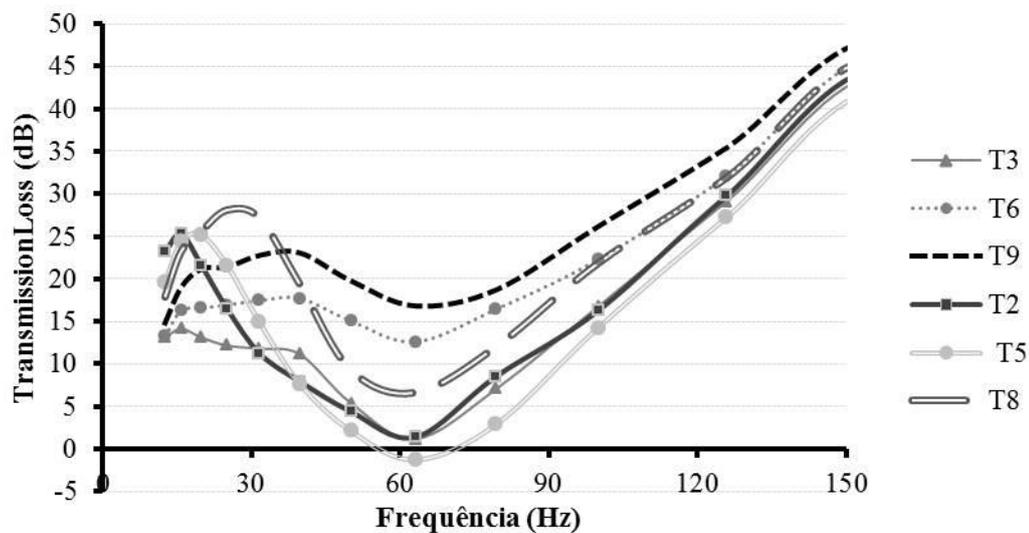
APÊNDICE B – Gráficos: camada de ar x dupla espessura em painéis laboratoriais

Figura 11.1 Frequência baixa – 0 a 500 Hz



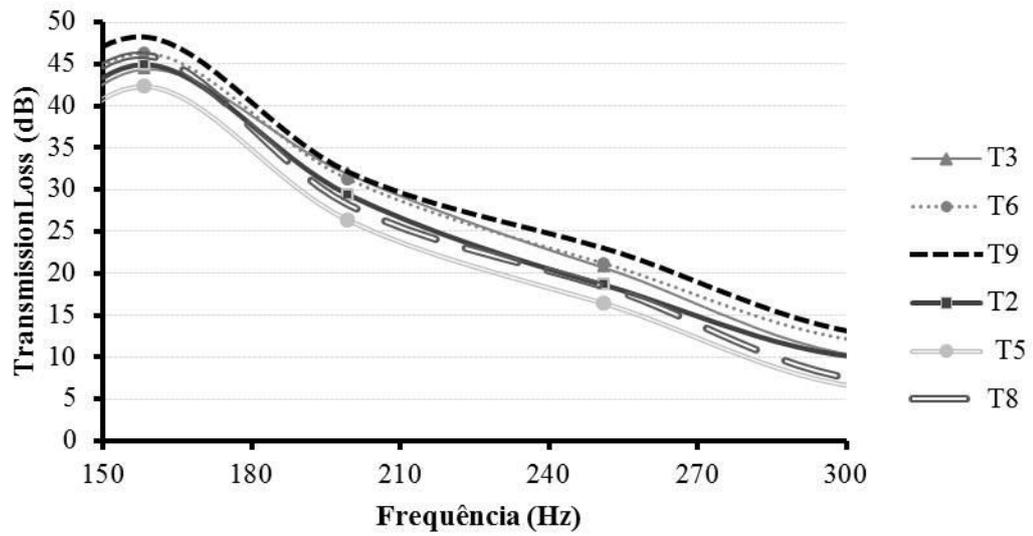
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.2 Lab 0 a 150 Hz



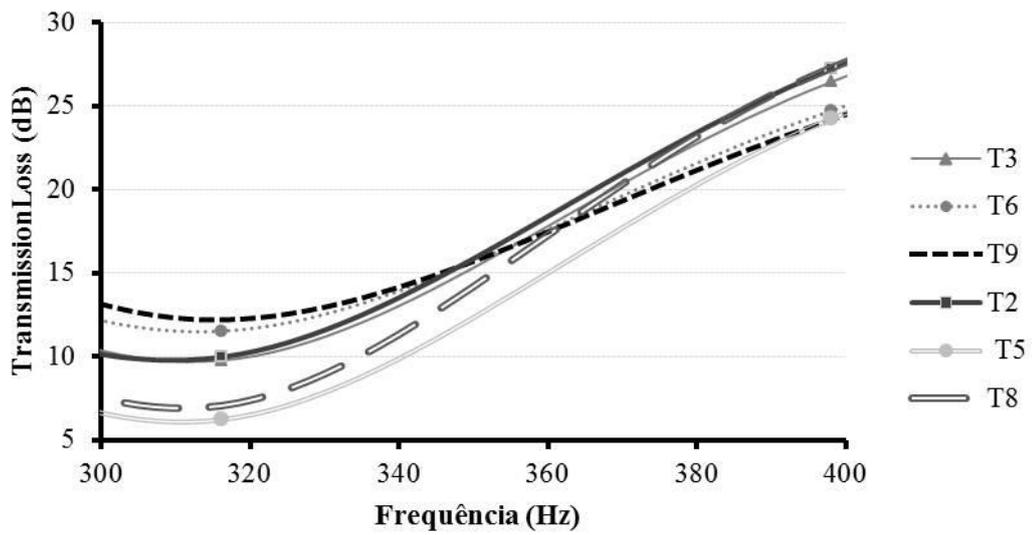
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.3 Lab 150 a 300 Hz



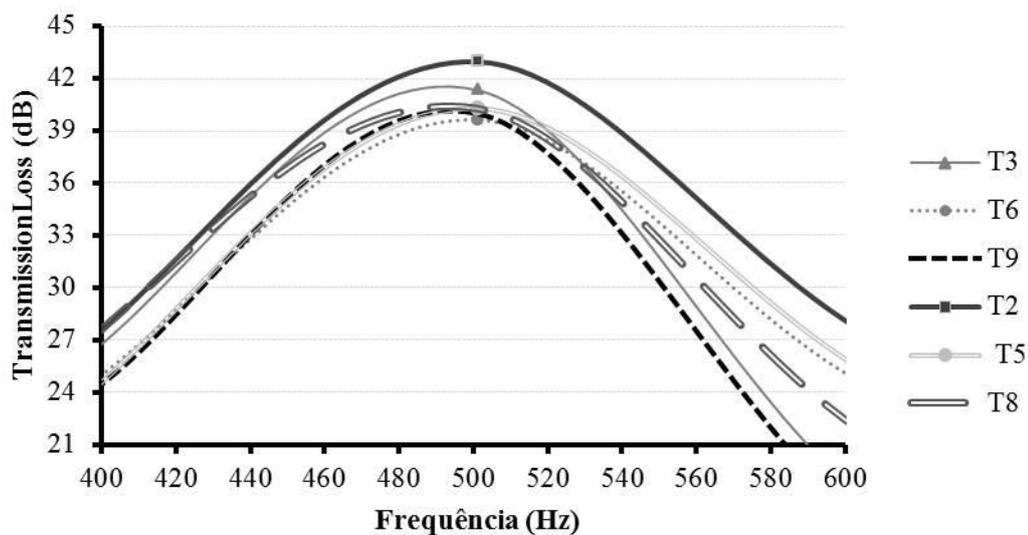
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.4 Lab 300 a 400 Hz



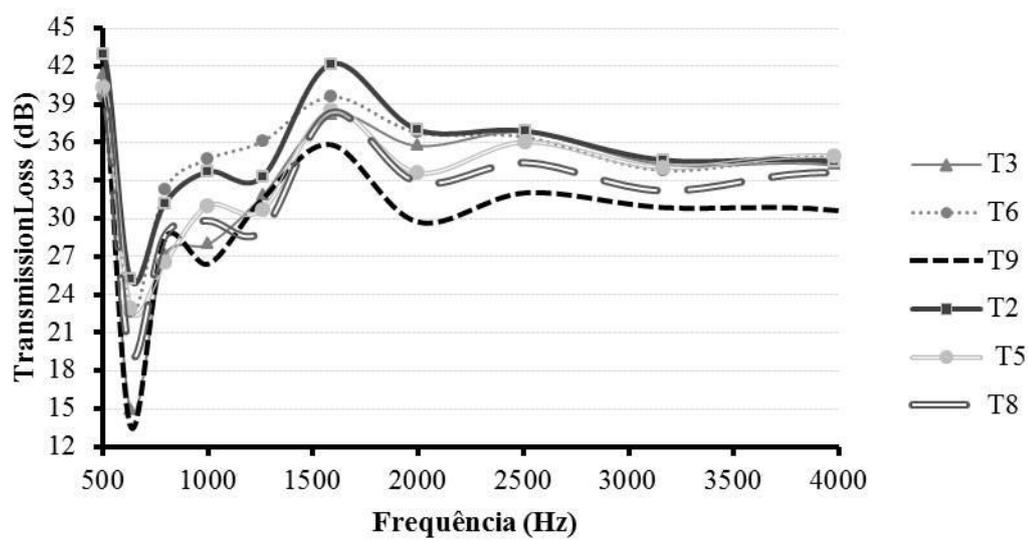
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.5 Lab 400 a 600 Hz



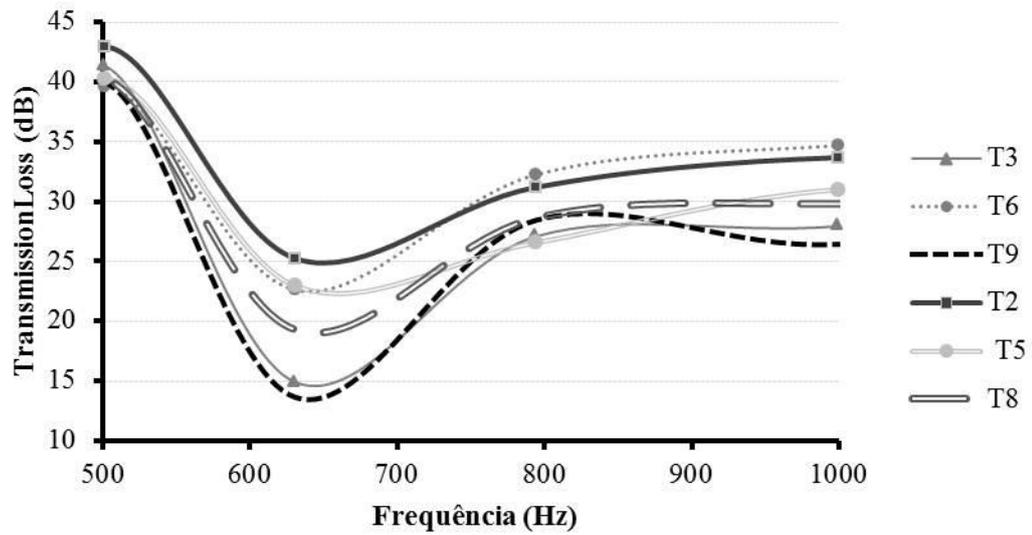
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.6 Lab frequência média – 500 a 4000 Hz



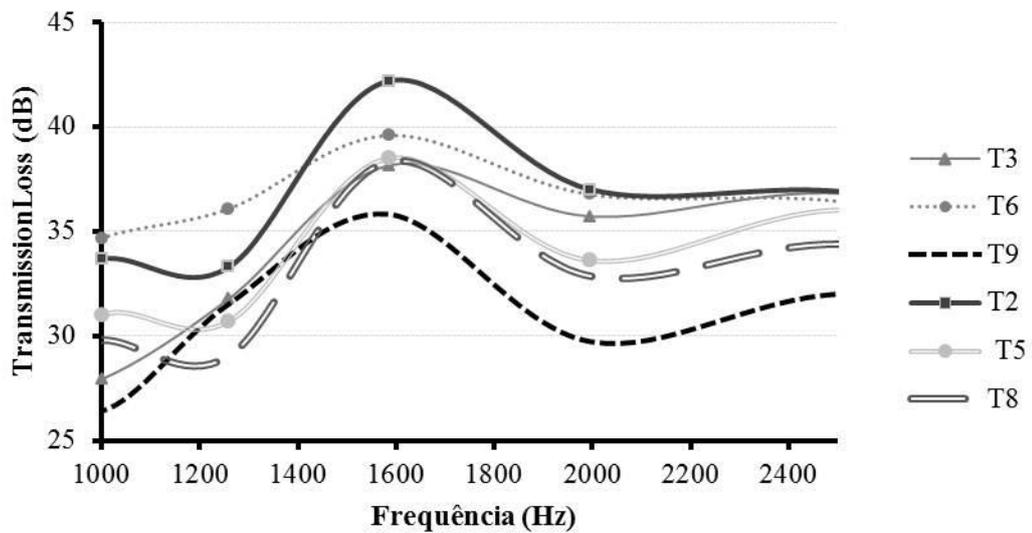
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.7 Lab 500 a 1000 Hz



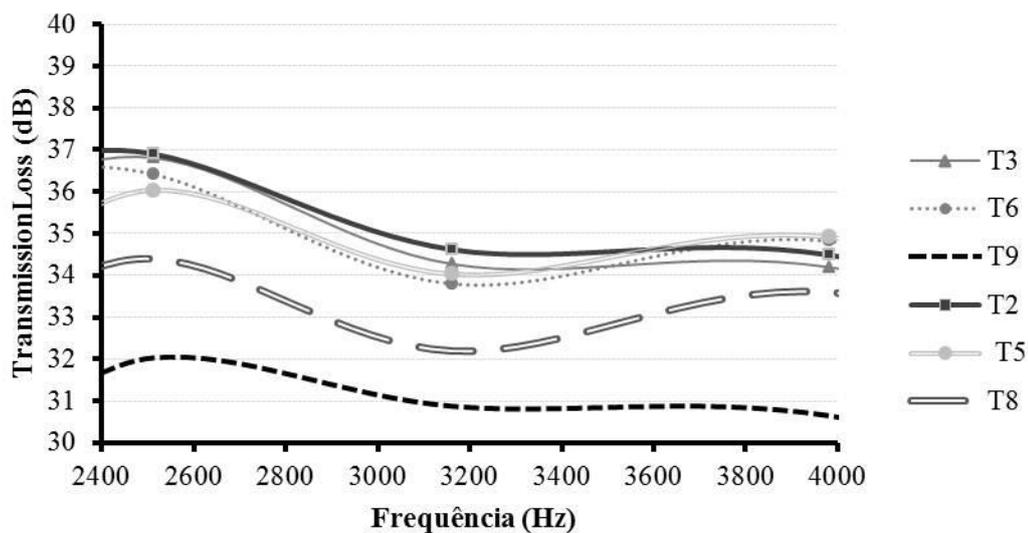
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.8 Lab 1000 a 2400 Hz



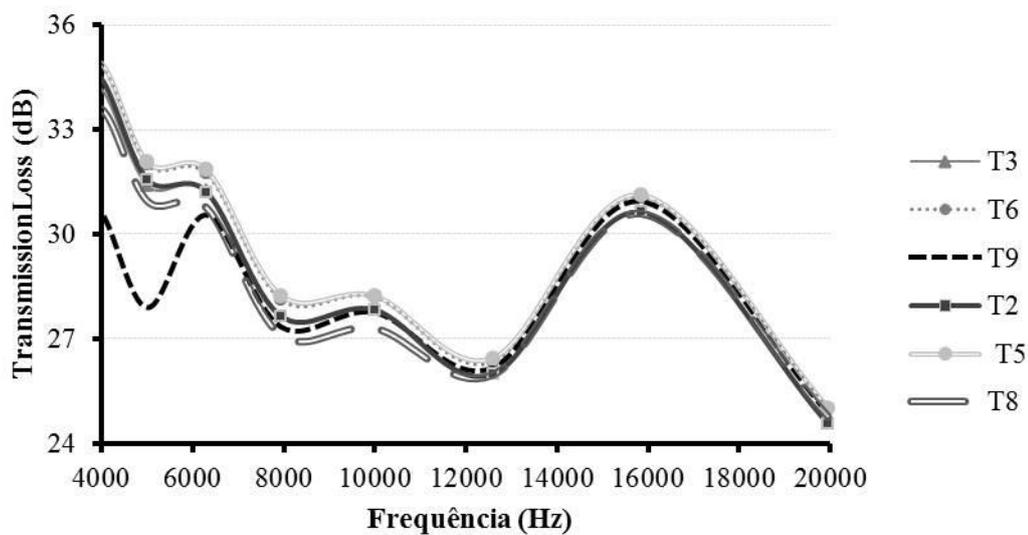
Fonte: Da Autora (2017).

Fifura 11.9 Lab 2400 a 4000 Hz



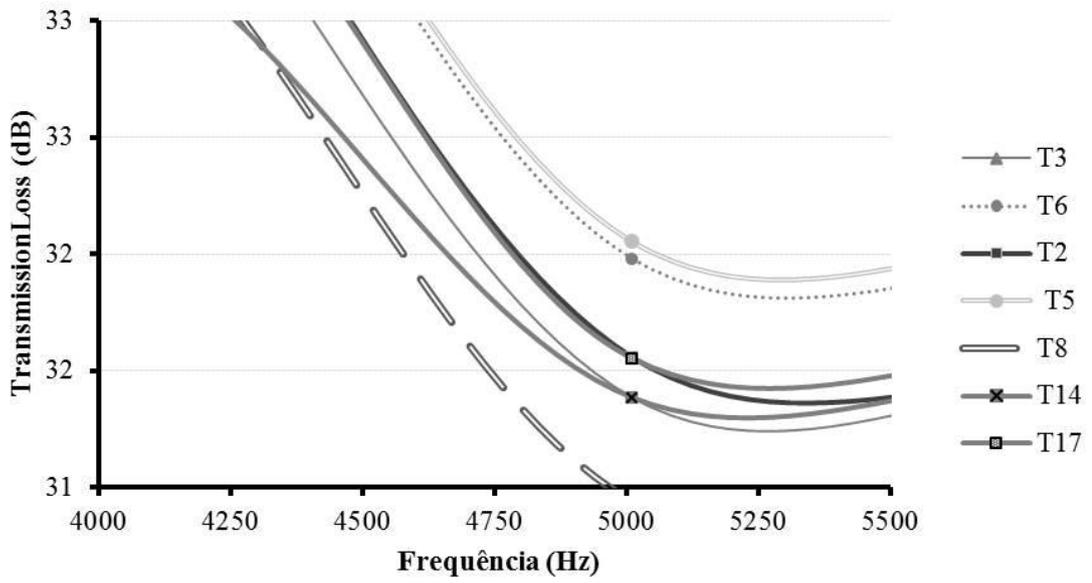
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.10 Lab frequência alta – 4000 a 20000 Hz



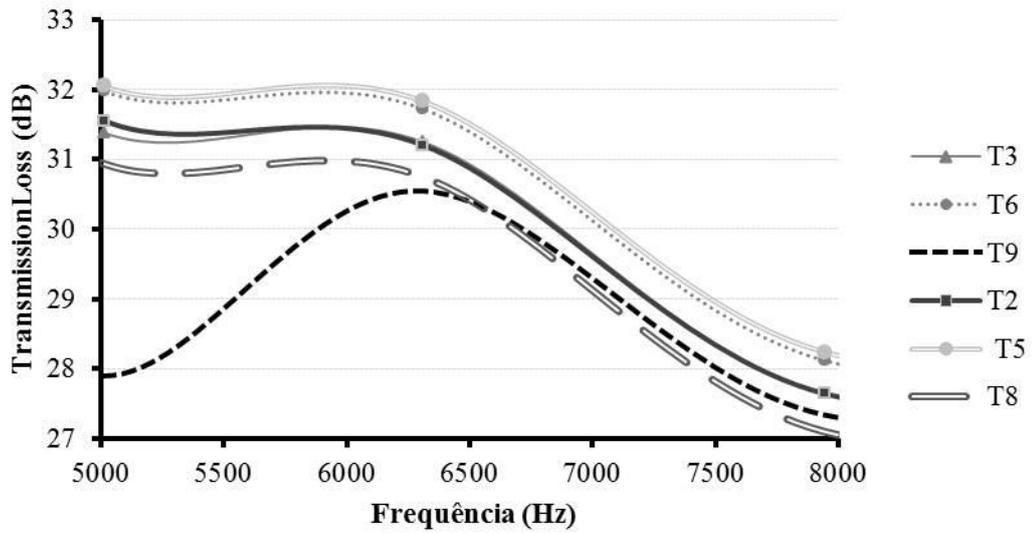
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.11 Laboratoriais e os melhores industriais 4000 a 5400 Hz



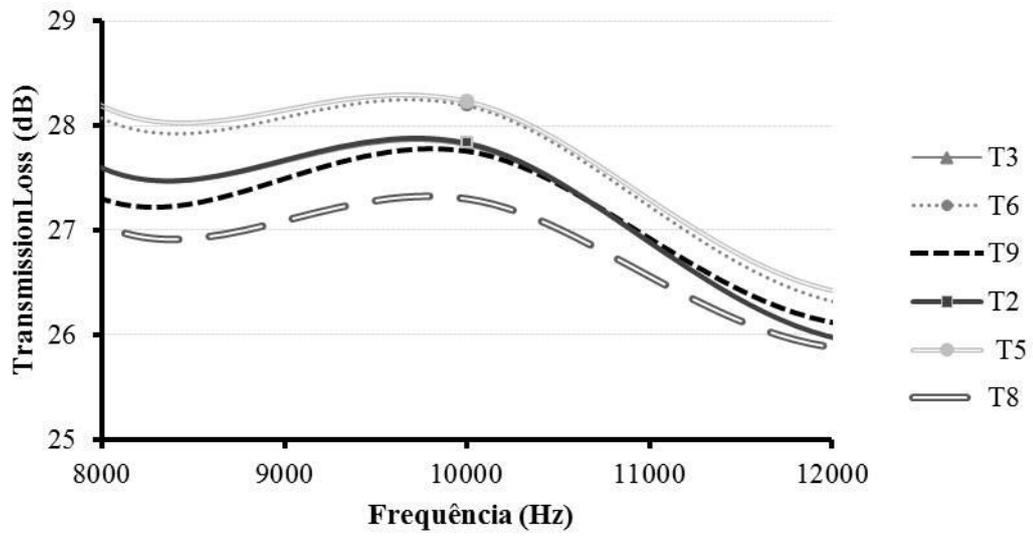
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.12 Lab 5000 a 8000 Hz



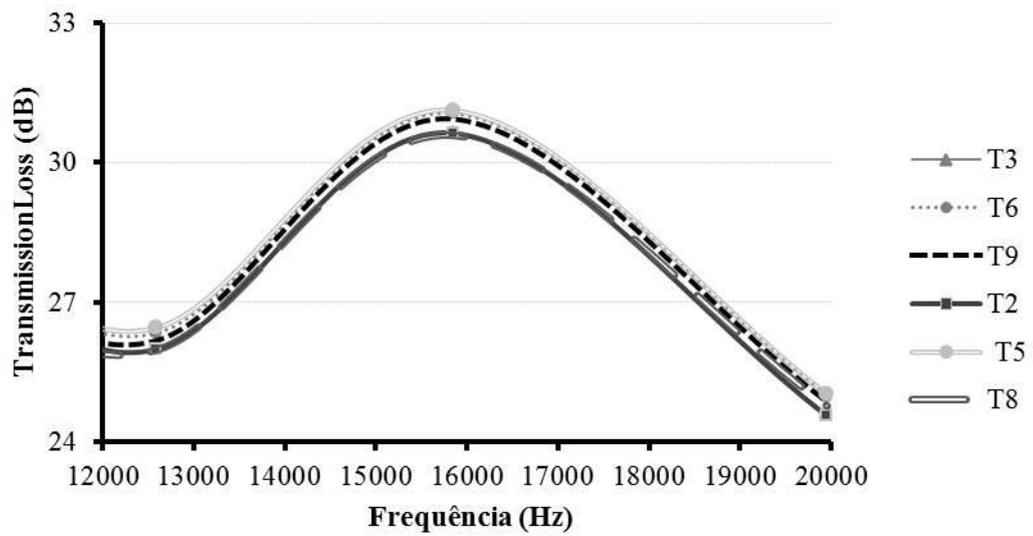
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.13 Lab 8000 a 12000 Hz



Fonte: Da Autora (2017).

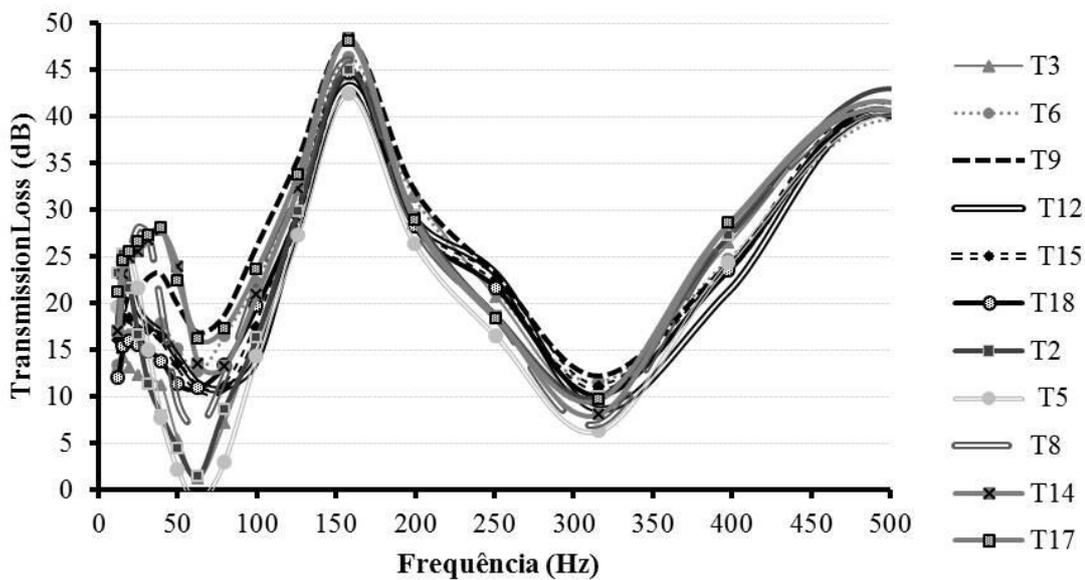
Figura 11.14 Lab 12000 a 20000 Hz



Fonte: Da Autora (2017).

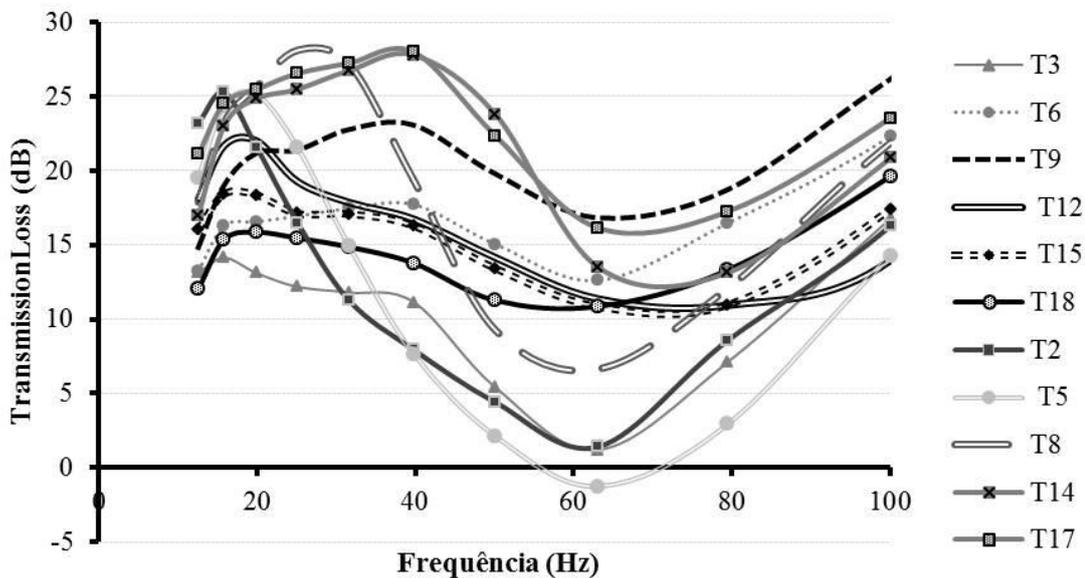
APÊNDICE C – Gráficos: camada de ar x dupla espessura em painéis laboratoriais x industriais

Figura 11.15 Lab x Ind frequência baixa – 0 a 500 Hz



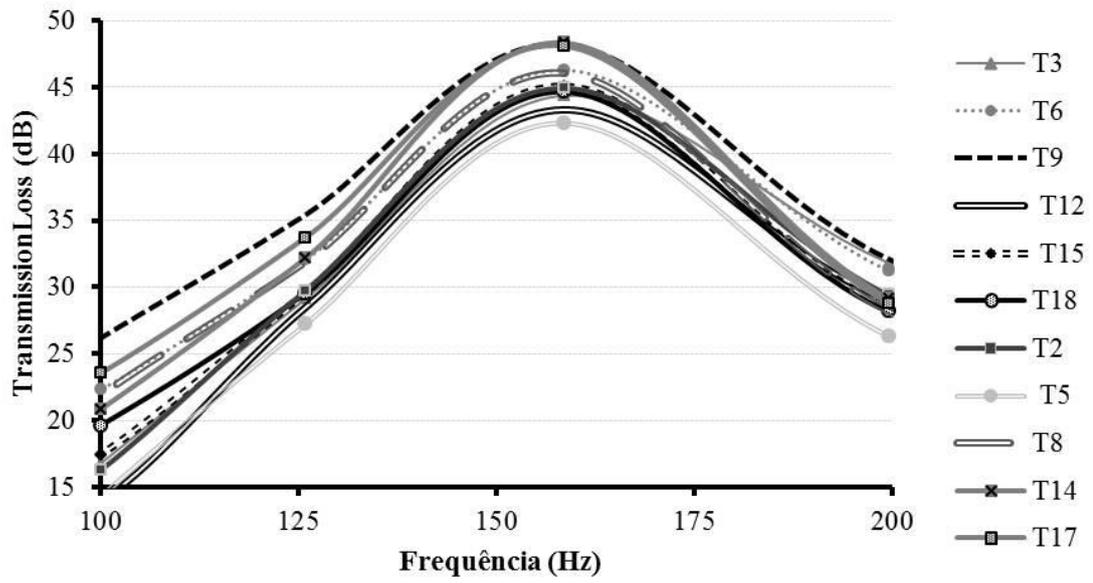
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.16 Lab x Ind 0 a 100 Hz



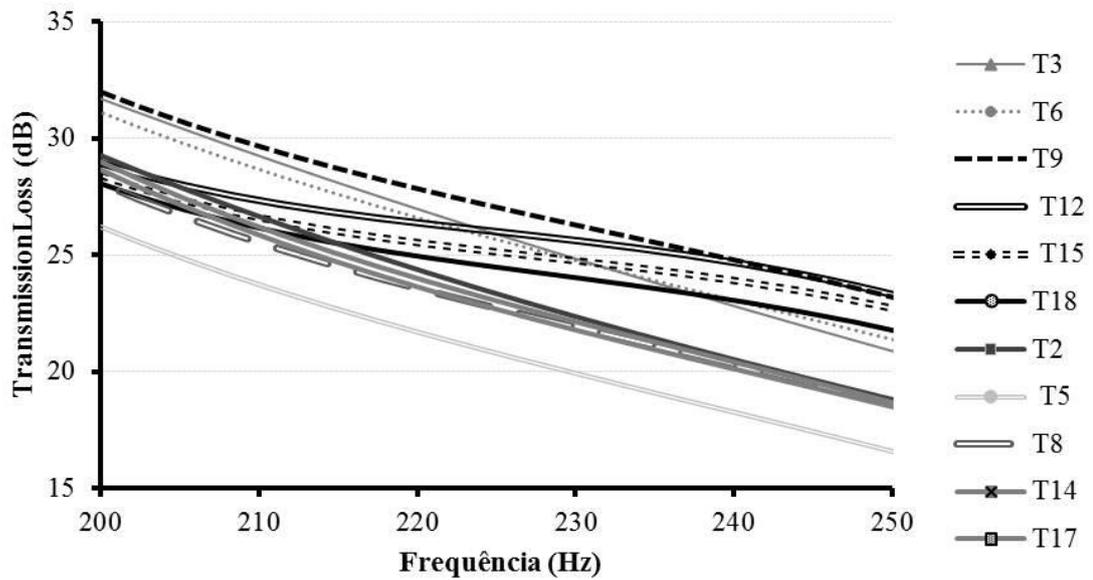
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.17 Lab x Ind 100 a 200 Hz



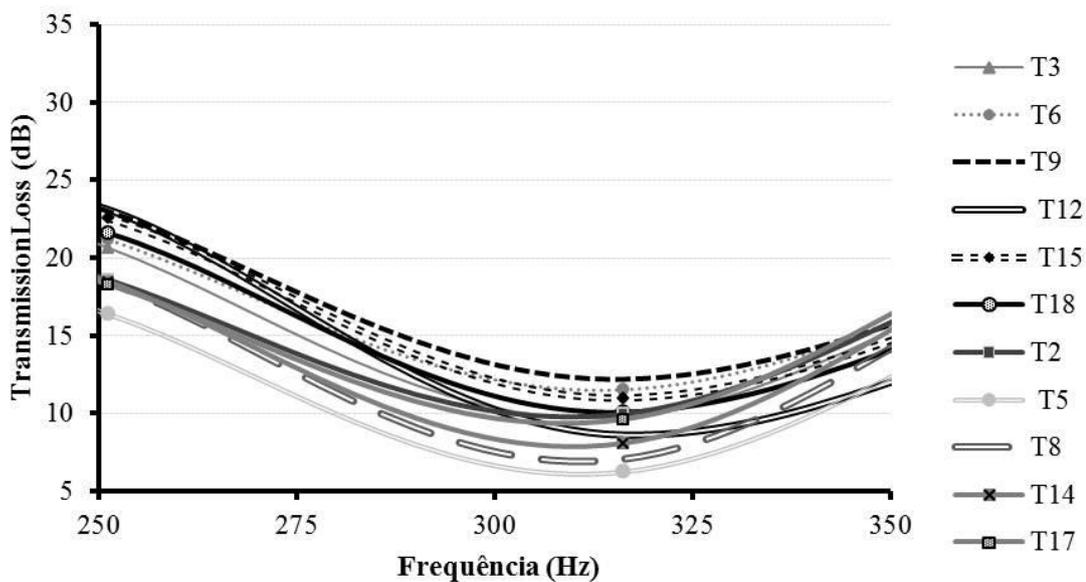
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.18 Lab x Ind 200 a 250 Hz



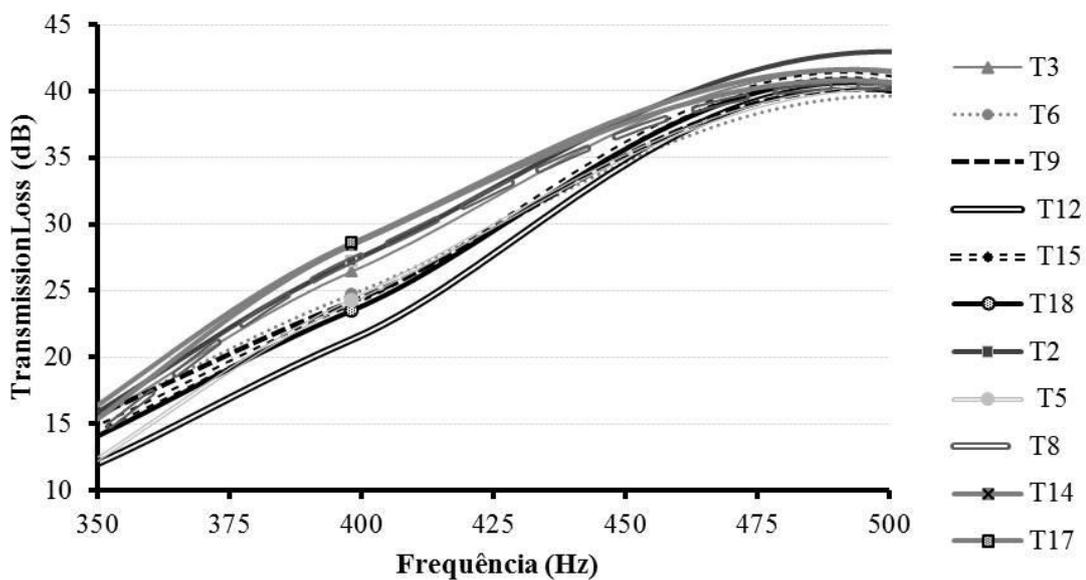
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.19 Lab x Ind 250 a 350 Hz



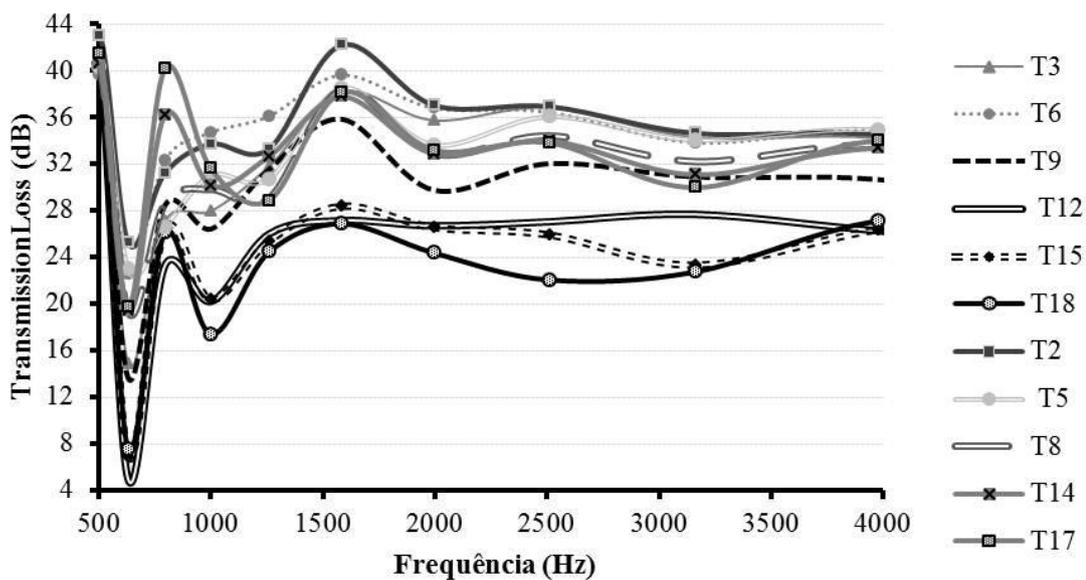
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.20 Lab x Ind 350 a 500 Hz



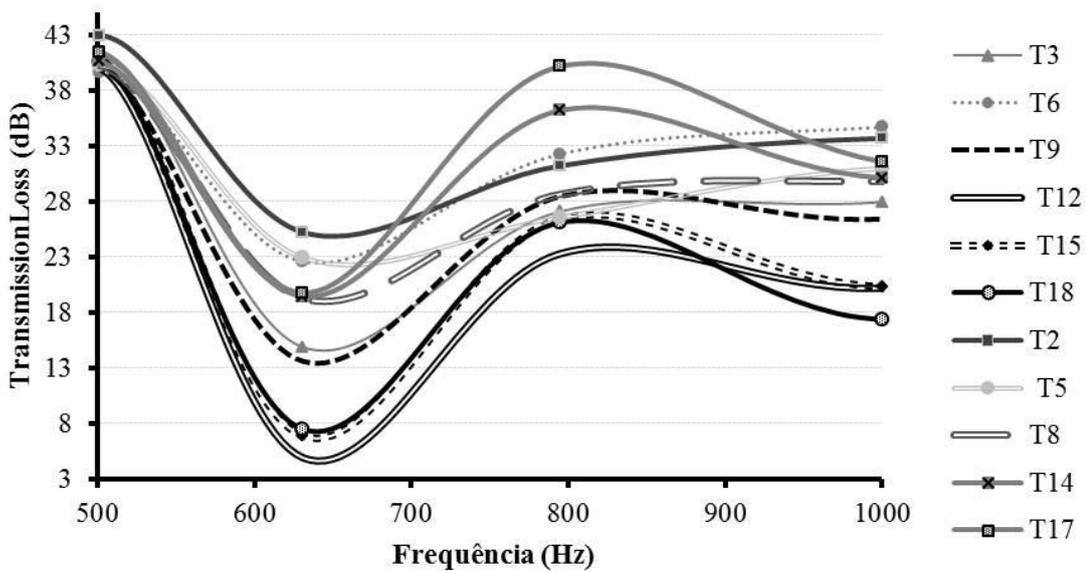
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.21 Lab x Ind frequência média 500 a 4000 Hz



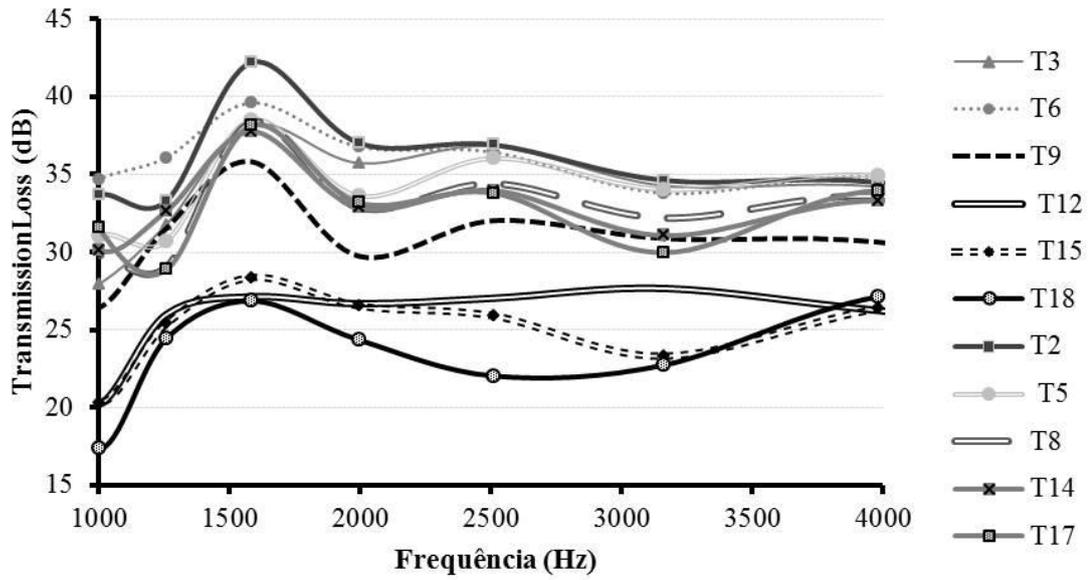
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.22 Lab x Ind 500 a 1000 Hz



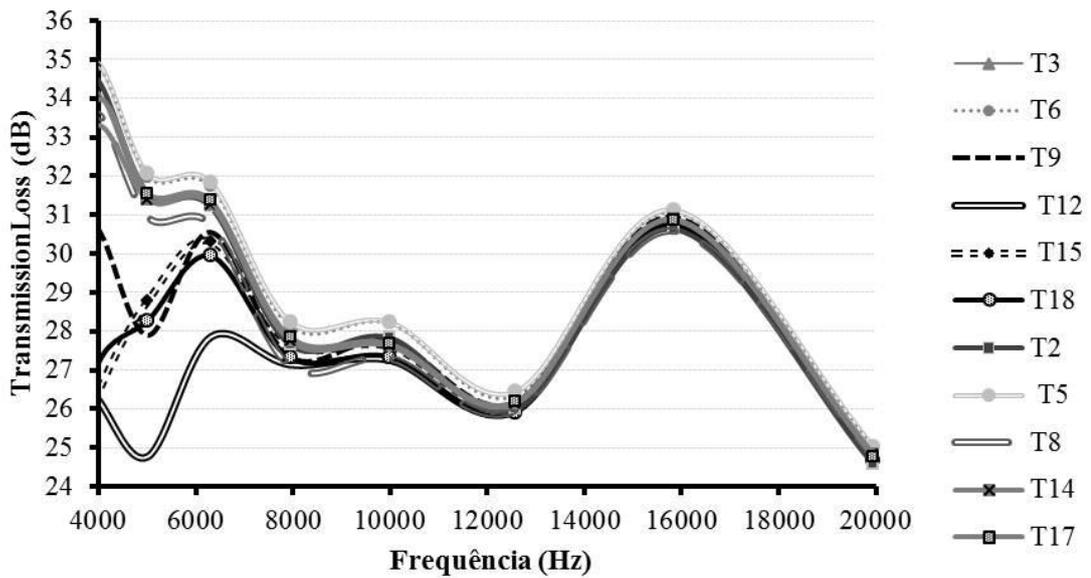
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.23 Lab x Ind 1000 a 4000 Hz



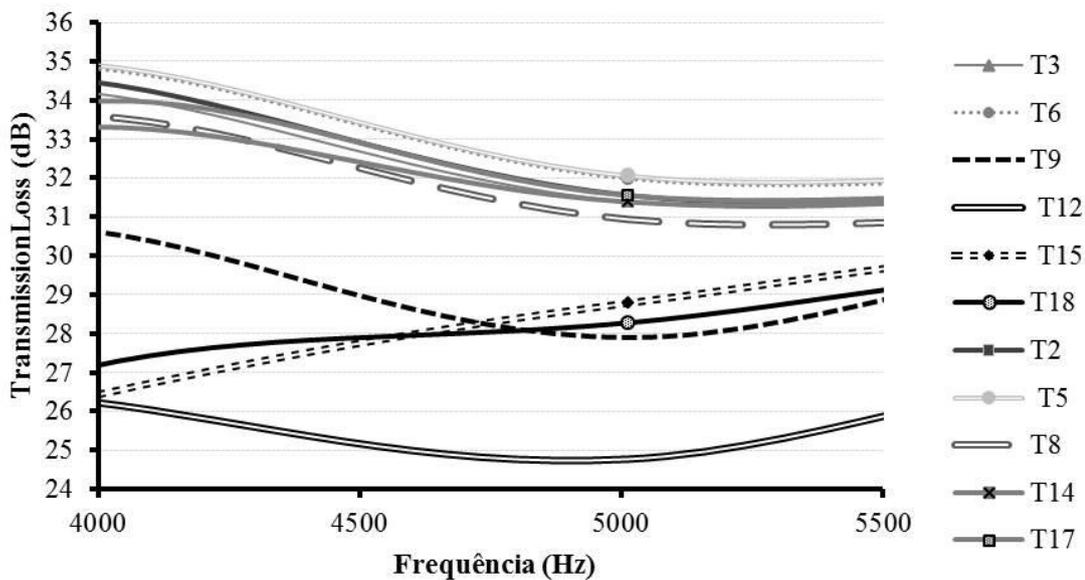
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.24 Lab x Ind frequência alta – 4000 a 20000 Hz



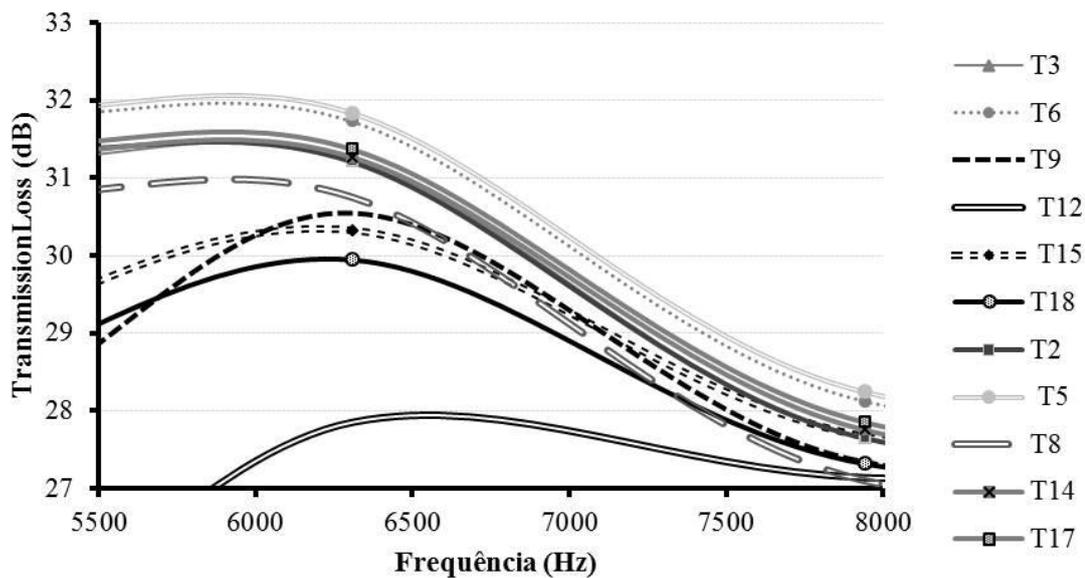
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.25 Lab x Ind 4000 a 5500 Hz



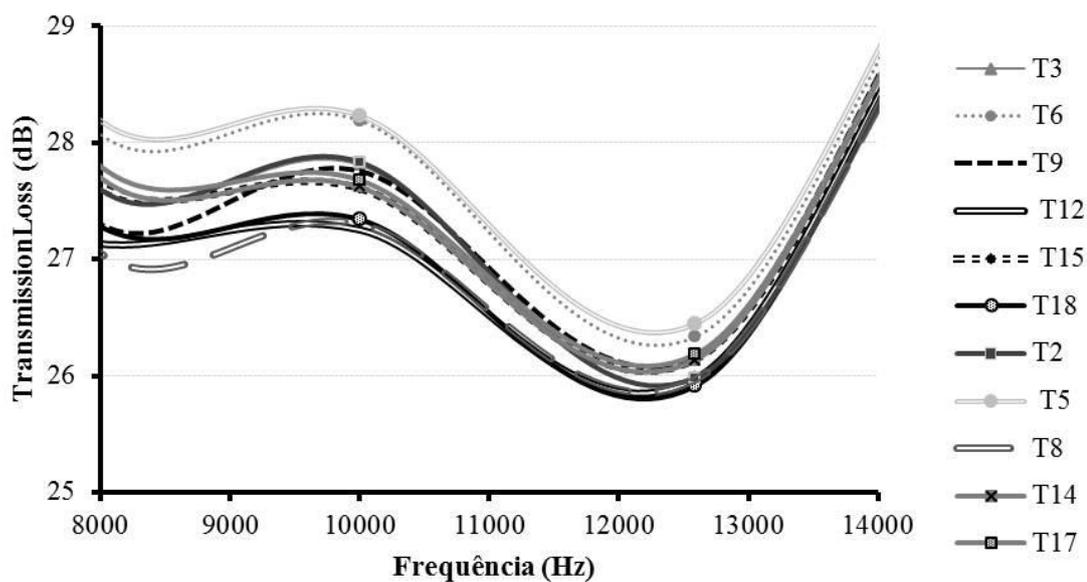
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.26 Lab x Ind 5500 a 8000 Hz



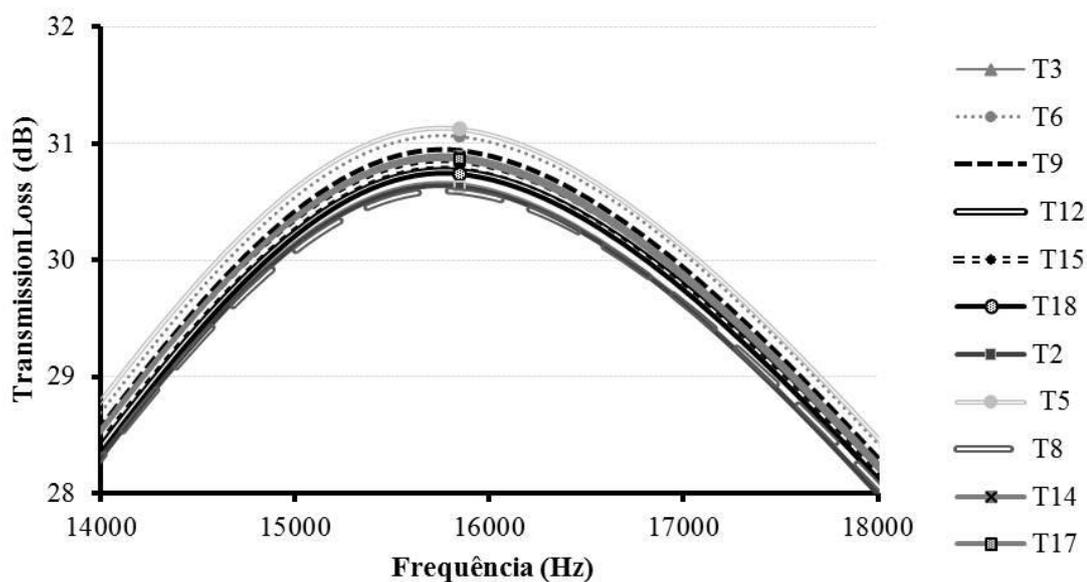
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.27 Lab x Ind 8000 a 14000 Hz



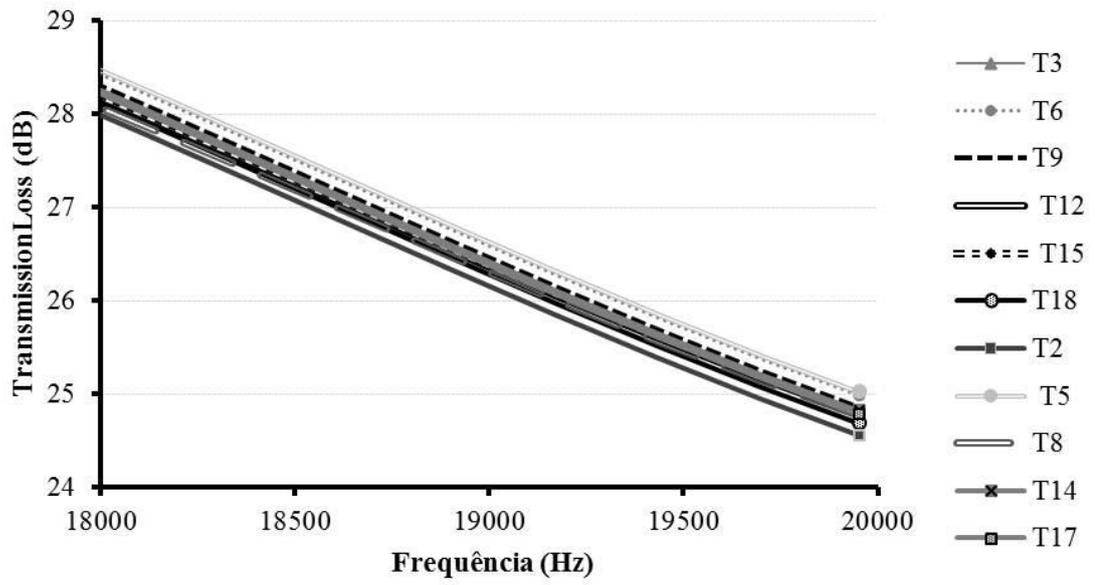
Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.28 Lab x Ind 14000 a 18000 Hz



Fonte: Da Autora (2017).

Figura 11.29 Lab x Ind 18000 a 20000 Hz



Fonte: Da Autora (2017).

APÊNDICE D – Tabelas de análise de variância e testes de média dos tratamentos

Tabela D1 - Análise de variância Linha 1 TL - baixa frequência

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	165.899983	33.179997	72.465	0.0000
erro	18	8.241800	0.457878		
Total corrigido	23	174.141783			

CV(%) = 4.63 Média geral: 14.6208333. Número de observações: 24

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio
 Teste Scott-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.
 Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D2 - Teste de média Linha 1 – baixa frequência

Teste de Scott e Knott (1974) para a FV TRAT

NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,3383333333333333

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
4	10.020000	a1
1	13.002500	a2
7	14.147500	a3
10	15.812500	a4
16	16.695000	a4
13	18.047500	a5

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade
 Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D3 - Análise de variância Linha 2 TL - baixa frequência

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	190.208333	38.041667	34.671	0.0000
erro	18	19.750000	1.097222		
Total corrigido	23	209.958333			

CV (%) = 4.88 - Média geral: 21.4583333. Número de observações: 24

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio
 Teste Scott-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.
 Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D4 - Teste de média Linha 2 – baixa frequência

 Teste Scott-Knott (1974) para a FV TRAT

NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,523741878749022

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
5	17.250000	a1
2	18.250000	a1
8	21.750000	a2
11	22.750000	a2
14	23.750000	a3
17	25.000000	a3

 Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D5 - Análise de variância Linha 3 TL - baixa frequência

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	104.708333	20.941667	0.304	0.9041
erro	18	1240.250000	68.902778		
Total corrigido	23	1344.958333			

CV (%) = 41.42

Média geral: 20.0416667 Número de observações: 24

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio

Teste Scott-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D6 - Análise de variância Linha 1 TL - média frequência

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	87.159371	17.431874	161.247	0.0000
erro	18	1.945925	0.108107		
Total corrigido	23	89.105296			

CV (%) = 1.65

Média geral: 19.9729167 Número de observações: 24

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio

Teste Scott-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D7 - Teste de média Linha 1 – média frequência

 Teste Scott-Knott (1974) para a FV TRAT

NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,16439810251676

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
10	18.330000	a1
13	18.622500	a1
16	18.895000	a2
7	19.172500	a2
4	21.067500	a3
1	23.750000	a4

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D8 - Análise de variância Linha 2 TL média frequência.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	36.875000	7.375000	13.615	0.0000
erro	18	9.750000	0.541667		
Total corrigido	23	46.625000			

CV (%) = 2.24

Média geral: 32.8750000 Número de observações: 24

FV: fonte de variação; GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio
 Teste Scott-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D9 - Teste de média Linha 2 – média frequência

Teste Scott-Knott (1974) para a FV TRAT

NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,367990036096994

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
11	31.250000	a1
8	32.000000	a1
14	32.750000	a2
5	32.750000	a2
17	33.250000	a2
2	35.250000	a3

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D10 - Análise de variância Linha 3 TL média frequência.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	401.000000	80.200000	3.530	0.0213
erro	18	409.000000	22.722222		
Total corrigido	23	810.000000			

CV (%) = 16.73

Média geral: 28.5000000 Número de observações: 24

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio

Teste Scott-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D11 - Teste de média Linha 3 - média frequência

Teste Scott-Knott (1974) para a FV TRAT

NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4

Erro padrão: 2,38339160767918

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
18	24.000000	a1
12	24.750000	a1
15	25.250000	a1
9	30.000000	a2
3	32.250000	a2
6	34.750000	a2

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D12 - Análise de variância Linha 1 TL alta frequência

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	73.439671	14.687934	50.293	0.0000
erro	18	5.256825	0.292046		
Total corrigido	23	78.696496			

CV (%) = 2.24

Média geral: 24.1004167 Número de observações: 24

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio

Teste Scott-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D13 - Teste de média Linha 1 – alta frequência

Teste Scott-Knott (1974) para a FV TRAT

NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,270206325487272

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
10	20.722500	a1
7	23.637500	a2
13	24.162500	a2
16	24.530000	a3
4	25.090000	a3
1	26.460000	a4

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D14 - Análise de variância Linha 3 TL alta frequência

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	10.708333	2.141667	17.133	0.0000
erro	18	2.250000	0.125000		
Total corrigido	23	12.958333			

CV (%) = 1.26

Média geral: 27.9583333 Número de observações: 24

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio

Teste Scott-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D15 - Teste de média Linha 3 – alta frequência

Teste Scott-Knott (1974) para a FV TRAT

NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,176776695296637

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
12	26.750000	a1
18	27.750000	a2
15	28.000000	a2
9	28.000000	a2
3	28.250000	a2
6	29.000000	a3

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

Fonte: Da Autora (2017).

Tabela D16 - Análise de variância Linha 2 TL alta frequência

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRAT	5	1.833333	0.366667	1.200	0.3485
erro	18	5.500000	0.305556		
Total corrigido	23	7.333333			

CV (%) = 1.93
 Média geral: 28.666667 Número de observações: 24

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio

Teste Scoot-Knott para médias. e*: valor significativo, a 95% de probabilidade.

Fonte: Da Autora (2017).