

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL NÍVEL
MESTRADO**

SÉRGIO KLIPPEL FILHO

**ANÁLISE DA ABSORÇÃO SONORA DE PAINÉIS E *BAFFLES* A BASE DE
RESÍDUOS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)**

São Leopoldo

2021

SÉRGIO KLIPPEL FILHO

**ANÁLISE DA ABSORÇÃO SONORA DE PAINÉIS E *BAFFLES* A BASE DE
RESÍDUOS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Coorientadora: Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira

São Leopoldo

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

K65a Klippel Filho, Sérgio
Análise da absorção sonora de painéis e *baffles* a base de resíduos de politereftalato de etileno (PET) / Sérgio Klippel Filho. – 2021.
143 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2021.
“Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian”

1. Engenharia Civil. 2. Acústica. 3. Absorção sonora. 4. Politereftalato de etileno (PET). I. Título.

CDU 624

Catálogo na Fonte:
Mariana Dornelles Vargas – CRB 10/2145

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, os agradecimentos vão para meus pais, Sérgio e Rosinea, colegas de profissão e responsáveis pelo apoio incondicional na busca pelo conhecimento, crescimento acadêmico, por acreditarem nas minhas visões e terem me proporcionado todas as oportunidades possíveis para minha evolução pessoal e profissional.

A minha parceira, Gabi, pela cumplicidade e carinho insubstituíveis, nos momentos em que tive de abdicar da nossa vida pessoal, que se mostraram muito necessários nas etapas finais desta pesquisa.

Ao meu orientador, Professor Bernardo, e coorientadora, Professora Maria Fernanda, parceiros de longa data que foram responsáveis pelo imenso auxílio no desenvolvimento da pesquisa e por acreditarem na minha capacidade de “abraçar” um tema como o proposto.

Ao itt Performance, laboratório em que me sinto em casa, personificado pela Eng. Maira e Me. Rafael, pelos anos de parceria, e aos incansáveis Lorenzo, Fabrício e Bianca que foram de suma importância para a conclusão do programa experimental desta pesquisa.

A empresa Planalto Têxtil, do companheiro Fabiano, que aceitou fornecer as mantas de lã de PET, mesmo trabalhando em uma época de crise como a que passamos durante o desenvolvimento do trabalho, confiando que os resultados da pesquisa viessem.

RESUMO

Na maioria das edificações, destinadas às mais variadas finalidades, a qualidade acústica tende a ser negligenciada, culminando para níveis incompatíveis de desempenho aos usuários, sendo que muitas vezes, as correções podem se tornar custosas e inviáveis. Desta forma, o condicionamento acústico de salas visa controlar o comportamento sonoro nos ambientes a fim de cumprir com requisitos de avaliação de acordo com o tipo de uso de cada espaço. O caminho percorrido pelas ondas sonoras da fonte emissora até a receptora altera as características do som originalmente emitido, principalmente pela geometria, materiais, elementos e objetos que compõem a sala. Para salas em que sua composição original não proporciona uma qualidade adequada à atividade desejada, materiais com a capacidade de absorção sonora podem ser adicionados, reduzindo a energia refletida de volta para o campo sonoro. Dentro da área dos materiais com capacidade de absorção sonora estão os materiais fibrosos, podendo ser fabricados a partir de lãs sintéticas de PET, sendo um material altamente consumido, não renovável e de alta possibilidade de reciclagem. Estas podem ser instaladas nas formas de painéis, *baffles* ou *banners*, nas quais o modo de instalação, em relação à superfície, tem grande impacto no espectro da capacidade de absorção sonora. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é verificar a influência da densidade e modo de instalação de mantas a base de lã de PET utilizada na forma de painéis e *baffles* na sua capacidade de absorção sonora. Para tal, ensaios de laboratório (ISO 354:2004) foram realizados com amostras de lã de PET aplicadas na forma de painéis, sem e com a presença de camada de ar de 5 e 10 cm, e *baffles*, 50 cm de altura e espaçados em 25, 50, 75 e 100 cm para determinação dos coeficientes de absorção sonora. Na condição de painel, quanto maior a densidade das mantas, mais elevados foram os coeficientes de absorção sonora, e a aplicação, e incremento, da camada de ar aumentou a absorção sonora nas baixas frequências e reduziu os resultados nas médias e altas frequências. E para os *baffles*, as maiores densidades de manta também resultou nos resultados mais elevados, e quanto mais distanciadas as fileiras de material maiores foram os coeficientes de absorção sonora em todas as bandas de frequência.

Palavras-chave: Absorção sonora. Painéis. Baffles. Lã de PET. Absorvedores sonoros fibrosos.

ABSTRACT

In most buildings, used for varied purposes, the quality and acoustic performance tend to be neglected, reaching in incompatible levels of comfort for users, where, many times, corrections can often become costly and unfeasible. In this way, the acoustic treatment of rooms aims to control the sound behavior in enclosed environments to comply with the defined requirements by the use of each space. The path travelled by the sound waves from the source to the receiver modifies the original characteristics of the emitted sound mainly by the geometry, materials, elements and objects that compose the room. For rooms where their original composition does not provide adequate comfort, materials with sound absorption capability can be added, reducing the sound energy reflected to the sound field. Within the field of materials with sound absorption capacity are the fibrous materials, which can be made of PET synthetic wools, that is a highly used material, non-renewable and with a huge recycling potential. These wools can be mounted in the form of panels, baffles or pads, where the mounting type, in relation to the reflective surface, has a great impact on their sound absorption spectrum. Therefore, this work aims to verify the influence of the density and mounting type of PET based wools used in the form of panels and baffles in their sound absorption capacity. For this, sound absorption tests were performed in a reverberation room (ISO 354:2003) using PET wool samples as panels, with and without airgaps of 5 and 10 cm, and baffles, with a height of 50 cm and mounted with 25, 50, 75 and 100 cm of spacing between rows. When installed as panels, the higher the density of the wools the greatest was the sound absorption coefficients, and the increase of the airgap resulted in higher sound absorption capacity in the low frequency range with smaller results in the mid and high frequency range. And for the baffles, the greatest wool densities also resulted in the highest results. Besides that, an increase in the sound absorption coefficients was evidenced, in practically all the frequency bands analyzed, when the distance between the rows of baffles was increased.

Key-words: Sound absorption. Panels. Baffles. PET wool. Fibrous sound absorbers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de meios de propagação direta e indireta	31
Figura 2 – Comportamento do som após interrupção da fonte emissora	32
Figura 3 – Reta de decaimento e tempo de reverberação com medição de decaimento de 30 dB	34
Figura 4 – Ressonador de (a) membrana e (b) de Helmholtz, ambos com material absorvente fibroso e em frente a elemento reflexivo	39
Figura 5 – Modos de fixação: (a) e (b) painéis - diretamente em paredes ou tetos, (c) <i>baffles</i> e <i>banners</i>	44
Figura 6 – Coeficiente de absorção sonora de 20 seções de 100x60x5 cm de manta de lã de rocha na configuração de painéis e <i>baffles</i>	45
Figura 7 – Influência do espaçamento de <i>baffles</i> de diferentes alturas.....	46
Figura 8 – Influência da altura de <i>baffles</i> em mesmas condições de espaçamento..	47
Figura 9 – Fluxograma das fases do programa experimental	57
Figura 10 – Disposição dos painéis nos tipos de montagem A, E50 e E100 na câmara reverberante	64
Figura 11 – Disposição dos arranjos de <i>baffles</i> nos tipos de montagem: (a) J250, (b) J500, (c) J750 e (d) J1000	69

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Fibras de PET recicladas (a) antes e (b) após abertura das fibras	59
Fotografia 2 – (a) Misturador/tremonha de alimentação e cardagem e (b) dobrador de véu	59
Fotografia 3 – (a) Consolidação térmica e (b) produto final	60
Fotografia 4 – Recorte de manta de lã de PET com máquina Singer 960C	63
Fotografia 5 – Estrutura de madeira para selagem lateral e cantoneiras para obtenção de camada de ar em painéis de 60 mm no tipo de montagem E100.....	65
Fotografia 6 – Amostra de 60 mm instalada dentro da câmara reverberante no tipo e montagem: (a) A e (b) E50	65
Fotografia 7 – Amostra de 60 mm instalada no tipo de montagem E100	66
Fotografia 8 – Amostra de 60 mm instalada dentro da câmara reverberante no tipo e montagem: (a) J250, (b) J500, (c) J750 e (d) J1000	67
Fotografia 9 – Fibra de PET reciclada na cor branca	72
Fotografia 10 – Estrutura de compensado plastificado com arame galvanizado e <i>baffle</i> de 60 mm.....	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm nos tipos de montagem A, E50 e E100	77
Gráfico 2 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm no tipo de montagem A.....	78
Gráfico 3 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm no tipo de montagem E50	79
Gráfico 4 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm no tipo de montagem E100	80
Gráfico 5 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm e 20 kg/m ³ nos tipos de montagem A, E50 e E100.....	81
Gráfico 6 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm e 25 kg/m ³ nos tipos de montagem A, E50 e E100.....	82
Gráfico 7 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm e 30 kg/m ³ nos tipos de montagem A, E50 e E100.....	83
Gráfico 8 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm nos tipos de montagem A, E50 e E100	84
Gráfico 9 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm no tipo de montagem A.....	86
Gráfico 10 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm no tipo de montagem E50	87
Gráfico 11 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm no tipo de montagem E100	88
Gráfico 12 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm e 30 kg/m ³ nos tipos de montagem A, E50 e E100.....	89
Gráfico 13 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm e 35 kg/m ³ nos tipos de montagem A, E50 e E100.....	90
Gráfico 14 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm e 40 kg/m ³ nos tipos de montagem A, E50 e E100.....	91
Gráfico 15 – Coeficientes de absorção sonora ponderados dos painéis de 60 mm nos tipos de montagem A, E50 e E100	92
Gráfico 16 – Coeficientes de absorção sonora ponderados dos painéis de 65 mm nos tipos de montagem A, E50 e E100	94

Gráfico 17 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 60 mm nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	96
Gráfico 18 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 60 mm nos tipos de montagem J250.....	97
Gráfico 19 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 60 mm nos tipos de montagem J500.....	98
Gráfico 20 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 60 mm nos tipos de montagem J750.....	99
Gráfico 21 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 60 mm nos tipos de montagem J1000.....	100
Gráfico 22 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 60 mm e 20 kg/m ³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	101
Gráfico 23 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 60 mm e 25 kg/m ³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	102
Gráfico 24 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 60 mm e 30 kg/m ³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	103
Gráfico 25 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 65 mm nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	105
Gráfico 26 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 65 mm nos tipos de montagem J250.....	106
Gráfico 27 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 65 mm nos tipos de montagem J500.....	107
Gráfico 28 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 65 mm nos tipos de montagem J750.....	108
Gráfico 29 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 65 mm nos tipos de montagem J1000.....	109
Gráfico 30 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 65 mm e 30 kg/m ³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	110
Gráfico 31 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 65 mm e 35 kg/m ³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	111
Gráfico 32 – Coeficientes de absorção sonora dos <i>baffles</i> de 65 mm e 40 kg/m ³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	112
Gráfico 33 – Coeficientes de absorção sonora ponderados dos <i>baffles</i> de 60 mm nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	113

Gráfico 34 – Coeficientes de absorção sonora ponderados dos <i>baffles</i> de 65 mm nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000	115
Gráfico 35 – Comparação entre os coeficientes de absorção sonora ponderados e a área de <i>baffles</i> por metro quadrado em amostras de 60 mm.....	116
Gráfico 36 – Comparação entre os coeficientes de absorção sonora ponderados e a área de <i>baffles</i> por metro quadrado em amostras de 65 mm.....	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Intervalos de classificação dos coeficientes de correlação r de Pearson	71
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de absorção sonora de materiais usuais	37
Tabela 2 – Coeficientes de absorção sonora de absorvedores porosos	41
Tabela 3 – Proporção e características para utilização de fibra bicomponente em CoPET/PET	54
Tabela 4 – Coeficientes de absorção sonora de mantas de lã de PET	56
Tabela 5 – Composições de manta de lã de PET	58
Tabela 6 – Características dos arranjos de <i>baffles</i>	68
Tabela 7 – Resultados médios de espessura, massa por unidade de área, densidade aparente e porosidade das amostras de lã de PET	75
Tabela 8 – Resultados de massa por unidade de área e densidade aparente das amostras.....	133
Tabela 9 – Resultados de espessura das amostras.....	135
Tabela 10 – Resultados de porosidade das amostras	136
Tabela 11 – Resultados de coeficiente de absorção sonora dos painéis.....	137
Tabela 12 – Resultados de coeficiente de absorção sonora dos <i>baffles</i>	140

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BFL	Baffle
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PET	Politereftalato de etileno
PNL	Painel
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila
RBC	Rede Brasileira de Calibração

LISTA DE SIGLAS

A	Área do corpo de prova
C	Clareza
cm	Centímetro
dB	Decibel
dtex	Unidade de medida de densidade linear de fibras
D	Definição
EDT	Early decay time
f	Frequência
G	Massa por unidade de área
Hz	Hertz
kg	Quilograma
m	Metro
M	Massa do corpo de prova
mm	Milímetro
ms	Milissegundo
r	Fator de correlação de Pearson
s	Segundo
S	Área superficial
SNR	Relação sinal-ruído
T	Tempo de reverberação
U	Razão útil-prejudicial
V	Volume da sala
α_s	Coefficiente de absorção sonora de Sabine
α_w	Coefficiente de absorção sonora ponderado
°C	Graus Célsius
ϵ	Porosidade
μm	Micrometro
ρ_f	Densidade média das fibras
ρ_m	Densidade aparente média da amostra

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 JUSTIFICATIVA	29
1.2 OBJETIVOS	29
1.2.1 Objetivo geral	30
1.2.2 Objetivos específicos	30
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA	30
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1 ACÚSTICA DE SALAS.....	31
2.1.1 Fenômenos envolvidos	31
2.1.2 Parâmetros de avaliação	33
2.1.3 Superfícies e objetos	36
2.1.4 Sistemas para condicionamento acústico	37
2.1.4.1 Difusores	38
2.1.4.2 Painéis ressonantes	38
2.1.4.3 Absorvedores porosos.....	39
2.2 O POLI(TEREFTALATO DE ETILENO): PET	48
2.2.1 Composição e produção	48
2.2.2 Descarte e reciclagem	50
2.2.3 Mantas de lã de PET	52
2.2.3.1 Método de fabricação	52
2.2.3.2 Propriedades acústicas	54
3 MÉTODO	57
3.1 DEFINIÇÃO DAS ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	57
3.1.1 Fase I: Desenvolvimento e caracterização física das mantas	58
3.1.2 Fase II: Desenvolvimento dos painéis e baffles	62
3.1.3 Fase III: Medição dos coeficientes de absorção sonora das amostras	63
3.2 MATERIAIS	71
3.2.1 Fibras de poliéster	71
3.2.2 Estrutura de madeira	72
4 RESULTADOS	75
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	75
4.2 COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA	76

4.2.1 Painéis.....	76
4.2.2 Baffles	95
5 CONCLUSÃO	119
REFERÊNCIAS.....	121
APÊNDICE A – RESUMO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS MANTAS	133
APÊNDICE B – RESUMO DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO SONORA.....	137

1 INTRODUÇÃO

Em grande parte das edificações, em salas utilizadas para trabalho, ensino, comunicação, prática esportiva, tratamento médico e recreação, dentre outras, mais atenção deveria ser dada à qualidade acústica, o que resulta em níveis incompatíveis de desempenho aos usuários. Esta insuficiência de desempenho geralmente está ligada a má especificação dos materiais utilizados, podendo ser bastante séria e custosa, gerando incômodo para o proprietário e constrangimento ao projetista. Desta forma, é importante que o desempenho acústico seja considerado desde as primeiras etapas de projeto de modo a viabilizar economicamente as propostas (LECHNER, 2012; KONKANI; OAKLEY, 2012; FUCHS, 2013; ASSELINEAU, 2015; ESCOBAR; MORILLAS, 2015; MADBOULY et al., 2016; COX; D'ANTONIO, 2017).

Assim, a acústica de salas visa o controle do comportamento dos sons dentro de um ambiente fechado, no qual objetivo principal é o de promover um nível de desempenho adequado para a produção e recepção dos sons desejados para a atividade em questão. Desta forma, os critérios de avaliação dependem fortemente da função da edificação e da sala, variando seus requisitos entre os diferentes casos. Sendo que a qualidade da propagação dos sons a todos os ouvintes e o controle do ruído são os principais aspectos que determinam seu ambiente acústico (BARRETT; ZHANG, 2009; WILDE, 2018).

Neste cenário, essencialmente, um evento sonoro é dependente de uma fonte emissora e uma receptora, e o caminho que este percorre é função do meio de propagação em que este fenômeno está ocorrendo e das características do ambiente, como tamanho, geometria, objetos e materiais das superfícies. Estes elementos fazem com que as ondas sonoras sejam modificadas, ao longo de seu trajeto, tornando a audição um elemento complexo de ser estudado (BARRON, 2009; KLEINER; TICHY, 2014).

Assim, a resposta de um recinto a uma excitação acústica é condicionada pelo grau de modificações que as ondas sonoras sofrem. Sendo estas alterações causadas pela posição e orientação de superfícies reflexivas, elementos com capacidade de absorção sonora, posição dos materiais e objetos, geometria, volume e modos ressonantes da sala, influenciando diretamente na percepção do ouvinte em relação ao que foi originalmente emitido (LONG, 2014).

Quando verificada uma insuficiência de desempenho acústico em um ambiente fechado, materiais com a propriedade de absorção sonora podem ser inseridos, modificando o comportamento do campo sonoro, de modo a efetuar as correções necessárias. Para isso, é necessária a inserção de materiais que possuam tal característica, alterando o comportamento das ondas sonoras, ao substituir superfícies reflexivas por materiais de alta absorção sonora, reduzindo a quantidade de energia refletida para o campo sonoro (SZYMANSKI, 2008; KLEINER; TICHY, 2014).

Estes materiais são comumente ofertados em forma de lã fibrosa, com matérias primas de origem mineral, a exemplo da lã de vidro e lã de rocha, origem natural, proveniente de plantas e animais, ou origem química (KOIZUMI; TSUJIUCHI; ADACHI, 2002; ATTENBOROUGH; VÉR, 2006; VIGRAN, 2008; MAMTAZ et al., 2016; IANNACE, 2017; KUTTRUFF, 2017; OTHMANI et al., 2017; LIM et al., 2018;).

Considerando os materiais de origem química, as fibras de poliéster (poli(tereftalato) de etileno - PET) são interessantes para a confecção mantas não tecidas e em forma de lã, em que a substituição de parte da matéria prima virgem por material reciclado tem resultado em coeficientes de absorção sonora satisfatórios, provando ser um material atrativo e com um viés ambiental (DEL REY et al., 2011).

Desta forma, para tal finalidade, a utilização de PET reciclado se mostra interessante dado o impacto ambiental que pode ser causado por este material, que tem sua biodegradação estimada em 500 a 700 anos, e causa inúmeros problemas de infraestrutura e de saúde à sociedade caso disposto de forma inadequada. No Brasil, em 2015, o montante de produtos em PET reciclado foi de 274.000 toneladas, representando 51% do total descartado, evidenciando a vasta quantidade deste material utilizada e a baixa taxa de reciclagem. Ainda, o consumo energético, para a fabricação das fibras que compõem as mantas, é reduzido em 80%, o consumo de água é 40% menor, e a emissão de dióxido de carbono é de 70%, com o uso da matéria prima reciclada em comparação à virgem (SCHEIRS, 1998; KARAYANNIDIS; ACHILIAS, 2007; LEPOITTEVIN; ROGER, 2011; ABIPET, 2016; MWANZA; MBOHWA, 2017).

1.1 JUSTIFICATIVA

De modo geral, no âmbito da acústica de salas, fica clara a necessidade da avaliação e previsão do comportamento do campo sonoro dentro dos espaços de modo a garantir a funcionalidade e propósito dos ambientes. Para tal, caso constatada insuficiência de desempenho, materiais fibrosos, em forma de lã, podem ser inseridos no ambiente para redução do número de reflexões, ajustando a energia do campo sonoro para a condição acústica ideal às atividades propostas. Neste caso, as características de absorção sonora do material devem ser consideradas frente às bandas de frequência de interesse (SZYMANSKI, 2008; LECHNER, 2012; FUCHS, 2013; KLEINER; TICHY, 2014; LONG, 2014; ASSELINEAU, 2015; COX; D'ANTONIO, 2017).

Ainda, o PET é um material obtido por recursos não renováveis, com alto consumo energético para sua produção e elevada possibilidade de se tornar um agente poluidor ao meio ambiente. Porém, este possui alta possibilidade de reinserção, via reciclagem, na cadeia produtiva de inúmeros produtos, incluindo nas fibras têxteis, fazendo com que um material de grande utilidade e alto impacto ambiental possa ser reinserido dentro do processo produtivo. Isto resulta na conservação de um recurso não renovável, reduz emissões atmosféricas, impacta menos no consumo energético, e diminui a possibilidade de danos ambientais, agregando sustentabilidade aos produtos que o utilizam (POURMOHAMMADI, 2007; LEPOITTEVIN; ROGER, 2011; THOMAS; VISAKH, 2011; ASHBY; JOHNSON, 2014; RUSSELL; SMITH, 2016; WYPYCH, 2016; YHAYA; TAJARUDIN; AHMAD, 2018).

Considerando o cenário manifestado, a execução deste trabalho é justificada, com a fabricação e caracterização acústica de um material com grande potencial, agregando a utilização de resíduos com a melhora na infraestrutura de edificações, resultando na integralização da reciclagem dos materiais com a promoção de ambientes com melhor desempenho acústico.

1.2 OBJETIVOS

A pesquisa foi desenvolvida de modo a atingir o cumprimento dos objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é produzir e caracterizar um material a base de um resíduo como matéria prima, que possua capacidade de absorção sonora, para utilização em acústica de salas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Produzir e caracterizar composições de manta a base de resíduo de PET com a finalidade de absorção sonora;
- b) Determinar sua capacidade de absorção sonora e analisar o impacto do posicionamento e forma de instalação dos sistemas em seu desempenho.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Visando a apresentação do trabalho realizado, a estruturação da dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo visa apresentar o tema proposto, sua relevância na área em questão e os objetivos geral e específicos. Já no segundo capítulo, estão contidos os conceitos básicos, necessários ao desenvolvimento do trabalho, bem como referências a estudos já realizados e normas aplicáveis, a nível nacional e internacional.

O terceiro capítulo apresenta os procedimentos e ensaios realizados para desenvolver as amostras e avaliação destas na atividade proposta, sendo delineados por metodologias presentes em normas e em estudos, envolvendo a caracterização física e acústica dos materiais. O quarto capítulo apresenta os resultados, e sua análise, das diferentes amostras desenvolvidas em variadas condições de fixação. Por fim, o quinto capítulo consiste nas conclusões obtidas no trabalho.

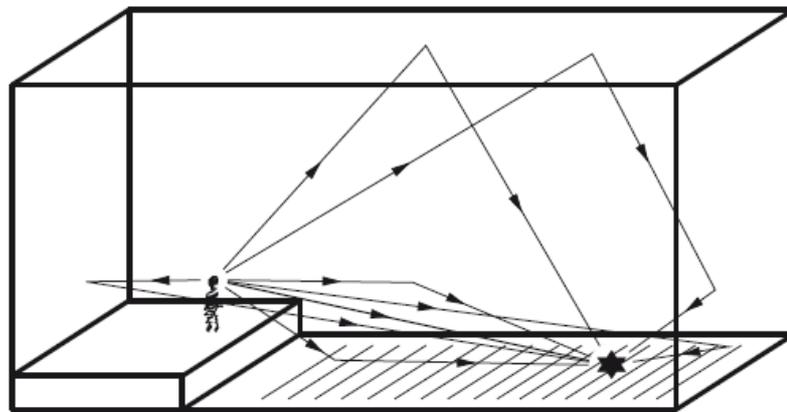
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ACÚSTICA DE SALAS

2.1.1 Fenômenos envolvidos

Os aspectos importantes a serem avaliados na acústica de salas podem ser elencados em termos da resposta acústica que a sala promove na percepção do ouvinte a partir de um sinal impulsivo. Na posição do receptor, as primeiras ondas sonoras a serem ouvidas são as provenientes do som direto, as quais se propagam, através do meio, diretamente da fonte até ele. Em seguida, as próximas ondas são as primeiras reflexões, advindas da reflexão do som nas paredes, piso, teto e componentes que constituem o ambiente, fazendo com que estas ondas sonoras necessitem percorrer maiores distâncias, como ilustrado na Figura 1 (BARRON, 2009).

Figura 1 – Exemplo de meios de propagação direta e indireta



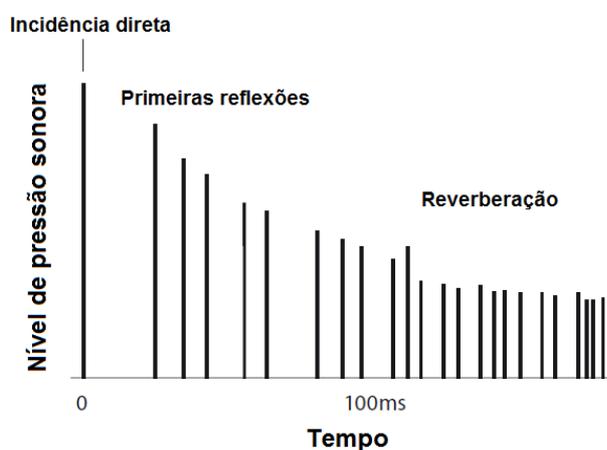
Fonte: Barron (2009)

Desta forma, as ondas sonoras advindas das reflexões são percebidas indireta e tardiamente, além de possuírem nível de pressão sonora inferior, compondo aspectos que influenciam na qualidade acústica da sala. Neste caso, o campo sonoro, a menos que o receptor esteja perto da fonte emissora, é predominantemente formado pelos sons refletidos (TURNER; PRETLOVE, 1991; BARRON, 2009).

De modo geral, estes efeitos, promovidos pelas características das salas, podem ser representados por um diagrama do nível de pressão sonora ao longo do

tempo, sendo este espectro denominado de resposta impulsiva. A resposta impulsiva da sala, como ilustrado na Figura 2, está diretamente associada com a recepção direta do som pelo ouvinte, as primeiras reflexões, e demais reflexões que ainda não foram atenuadas pelos mecanismos de amortecimento da sala e continuam transitando pelo ambiente. Estas últimas, geralmente depois de transcorridos 100 ms da interrupção da fonte emissora, resultam no evento denominado de som reverberante, possuindo sua duração denominada de tempo de reverberação (BARRON, 2009; COX; D'ANTONIO, 2017; ADELMAN-LARSEN, 2014).

Figura 2 – Comportamento do som após interrupção da fonte emissora



Fonte: Adaptado pelo autor de Barron (2009)

Resumidamente, a resposta impulsiva é função das alterações que a sala promove no caminho dos sons emitidos até as posições de recepção, onde as ondas sonoras podem ter caráter direto, sofrerem reflexão, difusão ou absorção em seu trajeto dentro do campo sonoro (BARRON, 2009; POHL, 2011; COX; D'ANTONIO, 2017).

Assim, a incidência direta é caracterizada pelo caminho mais curto, diretamente da fonte emissora ao ouvinte, em que a onda sonora sofre alteração apenas pelos mecanismos de amortecimento do som no ar, sendo dependente da frequência, temperatura, umidade relativa e pressão estática. Os sons diretos, ainda, auxiliam o ouvinte em localizar a fonte emissora, sendo uma peça chave na qualidade acústica da inteligibilidade e clareza do que está sendo propagado (HOPKINS, 2007; MOMMERTZ, 2008; BARRON, 2009).

Devido à presença de superfícies e objetos em uma sala, além da incidência direta, as ondas sonoras também são refletidas, atingindo, novamente, o ouvinte de forma direta e voltam a serem refletidas subsequentemente, até que estas se tornem inaudíveis devido ao amortecimento pelos elementos do ambiente. Neste caso, a maioria dos sons percebidos é proveniente das reflexões, visto que estes são refletidos inúmeras vezes, fazendo com que soem completamente diferentes da emissão inicial, possuindo um aspecto benéfico, ou maléfico, dependendo da finalidade do local (BARRON, 2009; EVEREST; POHLMANN, 2015).

Ainda, há a ocorrência da absorção sonora, que ocorre, em níveis diferentes, em todas as superfícies presentes no ambiente e de maneiras distintas, em função do tipo de substrato em que a onda sonora incide. Suas características influenciam diretamente na amplitude da relação das ondas sonoras incidentes e refletidas pela dissipação da energia vibratória das partículas de ar por meio de uma série de maneiras. Existem materiais e elementos utilizados especificamente para a finalidade de absorção sonora, sendo que cada um atinge o objetivo por meios diferentes, possuindo capacidades de absorção sonora, frente às bandas de frequência, relacionadas diretamente com sua natureza (MEYER, 2009; NEWELL, 2012; EVEREST; POHLMANN, 2015).

2.1.2 Parâmetros de avaliação

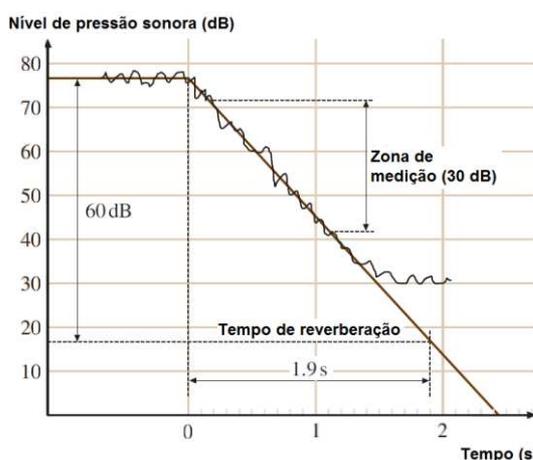
A avaliação da qualidade acústica de uma sala seja quando do interesse da inteligibilidade da fala e níveis de ruído em, por exemplo, escritórios e salas de aula, ou de atividade musical, em salas de concerto ou de ensaio, é uma tarefa complexa. Neste caso, é necessária a transformação da subjetividade do ato da audição em parâmetros objetivos e mensuráveis, sendo avaliados diversos descritores acústicos e intervalos de aceitação para cada tipo de sala e de aplicação (GADE, 2007; SHIELD et al., 2015; AHNERT; CONANT, 2017; FEISTEL, 2017; HOOVER, 2017; MCKAY, 2017; REITEN et al., 2017).

Neste caso, primeiramente, o fenômeno que é o mais característico na acústica de salas é o evento da reverberação, sendo considerado o parâmetro mais objetivo para determinação da qualidade acústica de um ambiente. Este ocorre pelo fato de que um som emitido dentro de um ambiente fechado não irá desaparecer imediatamente após a interrupção da emissão sonora, e sim permanecerá audível

no período seguinte, decrescendo, de forma lenta e gradativa, em intensidade pelos mecanismos de amortecimento da sala (BARRON, 2009; EVEREST; POHLMANN, 2015; KUTTRUFF, 2017).

Este parâmetro é visualizado por meio de um gráfico do decaimento do nível de pressão sonora, o qual ocorre de forma aproximadamente linear, a partir do momento de interrupção de uma fonte sonora, ao longo do tempo. A partir desta relação é possível determinar o tempo de reverberação, em segundos, que consiste no tempo necessário para a redução do decaimento do nível de pressão sonora inicial em 60 dB. Este decaimento ocorre de forma linear ao longo do tempo, sendo obtido por meio da equação da reta formada. Em medições, muitas vezes o tempo de reverberação não pode ser obtido com decaimentos de 60 dB, devido ao nível do ruído de fundo, sendo comumente medido com decaimentos de 10, 15, 20 ou 30 dB, como ilustrado na Figura 3 (KANG, 2002; HOPKINS, 2007; MEYER, 2009).

Figura 3 – Reta de decaimento e tempo de reverberação com medição de decaimento de 30 dB



Fonte: Adaptado pelo autor de Gade (2007)

A reverberação se torna mais audível em ambientes de grande volume, altos índices de reflexão das superfícies e poucos objetos em seu interior, em oposição à pequenas salas cheias de material absorvente. A quantidade de reverberação depende, então, do tamanho da sala e da área de absorção que esta possui. Neste caso, a sua redução pode ser obtida pela inserção de materiais absorventes, posicionados de forma a receber eficientemente as ondas sonoras, reduzindo o número de reflexões (COX; D'ANTONIO, 2017).

Desta forma, redução no tempo de reverberação é uma peça chave para, por exemplo, melhorar a inteligibilidade da fala, visto que sílabas previamente emitidas, que permanecem no campo sonoro, ainda podem ser ouvidas quando da recepção de novas falas, mascarando-as, além de reduzir o esforço vocal de quem está se pronunciando. Em contrapartida, com um tempo de reverberação muito reduzido, a qualidade sonora se torna muito direcional, impactando na qualidade da recepção e inteligibilidade da fala, devendo o ambiente possuir um tempo de reverberação adequado a sua finalidade (WHITLOCK; DODD, 2008; BARRON, 2009; RABELO et al., 2014; ANSELMET; MATTEI, 2016; BOTTALICO, 2017; COX; D'ANTONIO, 2017; LAM et al., 2018; GELFAND, 2018).

No caso de conversações em grupos separados dentro de uma sala, uma reverberação excessiva acaba por, também, aumentar o ruído ambiental dentro das salas, dada à tendência de elevação do tom de voz dos integrantes (*Efeito Café*). Isto ocorre subconscientemente, pelo fato de cada um dos grupos competir com o som reverberante do campo sonoro, fazendo com que a intensidade da fala seja, instintivamente, aumentada. Este fenômeno possui relativa linearidade na razão de aumento da voz em função do ruído ambiental. Isto ocorre não somente para que estes possam ser entendidos pelos membros do seu grupo, mas também acontece automaticamente, pelo *Efeito Lombard*, que ocorre visto que a audição de sua própria voz é um elemento necessário para a produção normal da fala (WHITLOCK; DODD, 2008; LONG, 2014; PENG; ZHANG; WANG, 2018).

Ainda, analisando as primeiras reflexões, em salas que necessitam de inteligibilidade da fala adequada, a proporção de energia sonora, presente na resposta impulsiva, deve ser maior na porção que chega inicialmente ao receptor, pois esta reforça os sons diretos. E no caso salas de concerto é preferível uma condição mais reverberante, com mais energia chegando tardiamente, em situação de performance, e uma maior energia inicial em condições de ensaio (BRADLEY; SATO; PICARD, 2003; BERANEK, 2004; BARRON, 2009).

Neste caso, deve ser avaliado o *Early Decay Time* (EDT), que auxilia na determinação da quantidade de energia presente nas primeiras reflexões, além das ondas sonoras que o atingem o ponto receptor em 50 ms (inteligibilidade da fala) ou 80 ms (música), após o som direto. Esta relação é obtida por meio da divisão da energia sonora recebida no tempo após a recepção do som direto pela energia total recebida o que resulta na porção inicial da energia. A avaliação da proporção de

energia presente nas primeiras reflexões pode ser realizada por meio da medição de parâmetros como Clareza (C_{50} ou 80), Definição (D_{50} ou 80) e Razão Útil-Prejudicial (U_{50} ou 80) (BERANEK, 2004; EGAN, 2007; BARRON, 2009; AHNERT; FEISTEL, 2017).

Por fim, os ruídos, em relação a emissões acústicas em salas, são opostamente o foco de interesse da atividade, visto que o ruído ambiental pode comprometer a percepção dos sons ao mascarar os sinais da mensagem emitida. Logo, de modo a promover uma qualidade adequada, a relação entre o nível de pressão sonora da fonte emissora e o ruído ambiental, denominada de Relação Sinal-Ruído (SNR), deve ser positiva. Assim, quanto mais positiva for a diferença, maior será a inteligibilidade da fala e a qualidade acústica da sala, fator que é função da potencia da fonte emissora, das atividades externas, isolamento dos sistemas construtivos e equipamentos da sala (KINSLER et al., 1982; BRADLEY, 1986ab; TOOLE, 2008; POHL, 2011; LONG, 2014; HARVIE-CLARK et al., 2015; SMALDINO et al., 2015).

2.1.3 Superfícies e objetos

Mesmo que de forma ineficiente, todas as estruturas rígidas e flexíveis absorvem os sons, porém, caso a sala em questão possua eficientes sistemas para absorção sonora, a contribuição destes demais elementos, que não possuem diretamente esta finalidade, pode ser negligenciada. Entretanto, em locais com a ausência de tratamento acústico para atenuação da energia do campo sonoro, a sua absorção sonora, em conjunto com a absorção do som pelo ar contam para a determinação da absorção sonora total da sala (ATTENBOROUGH; VÉR, 2006).

Quando do interesse da avaliação acústica de uma sala por meio de sua área de absorção sonora, é necessária a consulta aos fabricantes, ou literaturas de base, acerca dos coeficientes de absorção sonora (α_s) dos sistemas construtivos empregados no local, como os exemplos presentes na Tabela 1, para que seja garantida certa precisão à análise (COWAN, 2007).

Tabela 1 – Coeficientes de absorção sonora de materiais usuais

Material	Coeficiente de absorção sonora (α_s)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Parede de gesso acartonado pintada	0,10	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03
Parede de tijolo maciço revestida em argamassa	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Parede de bloco de concreto revestida em argamassa	0,12	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04
Parede de concreto alisado	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Parede de bloco de concreto pintado	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Parede de tijolo cerâmico	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Parede revestida em azulejo cerâmico ou mármore	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Piso de concreto	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Piso de borracha ou asfalto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Piso de parquet de madeira	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Piso cerâmico ou mármore	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Vidro – Espesso (grandes áreas)	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Vidro – Janela convencional	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Madeira compensada	0,58	0,22	0,07	0,04	0,03	0,07
Persianas metálicas	0,06	0,05	0,07	0,15	0,13	0,17
Cortina leve	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina pesada	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Carpete	0,05	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
Carpete sobre concreto	0,05	0,10	0,15	0,30	0,50	0,55
Carpete sobre borracha	0,05	0,15	0,13	0,40	0,50	0,60
Assentos estofados	0,19	0,37	0,56	0,67	0,61	0,59
Cadeira de metal ou madeira	0,15	0,19	0,22	0,39	0,38	0,30
Assentos estofados ocupados	0,39	0,57	0,80	0,94	0,92	0,87

Fonte: Adaptado pelo autor de Cowan (2007) e Egan (2007)

2.1.4 Sistemas para condicionamento acústico

Conforme supracitado, o som percebido em uma determinada posição dentro de uma sala consiste na recepção dos sons diretos e refletidos, em que, para garantir a qualidade acústica da sala, a intensidade e o espectro das ondas sonoras

refletidas deverá ser controlada, ponto no qual podem ser aplicados materiais com propriedades de absorção e/ou difusão (KLEINER; TICHY, 2014).

2.1.4.1 Difusores

Com a utilização de superfícies mais simples e menos ornamentadas na arquitetura moderna, certos ambientes carecem de difusibilidade sonora, sendo os difusores uma alternativa a este problema. Neste caso, estes podem ser constituídos por qualquer material com propriedades reflexivas frente às ondas sonoras e podem possuir diversas geometrias e modos de fixação. A difusão, propriamente dita, é uma forma de espalhamento da energia sonora incidente em uma superfície, em que uma efetiva difusão tem por objetivo o espalhamento do som sobre uma área considerável da sala, além da abrangência de uma banda larga de frequências de forma espacialmente uniforme, promovendo melhora nos descritores acústicos de interesse (NEWELL, 2012; BRADLEY et al., 2014; KLEINER; TICHY, 2014; COX; D'ANTONIO, 2017; GONZÁLEZ; COLNAGHI; OLIVEIRA, 2018).

2.1.4.2 Painéis ressonantes

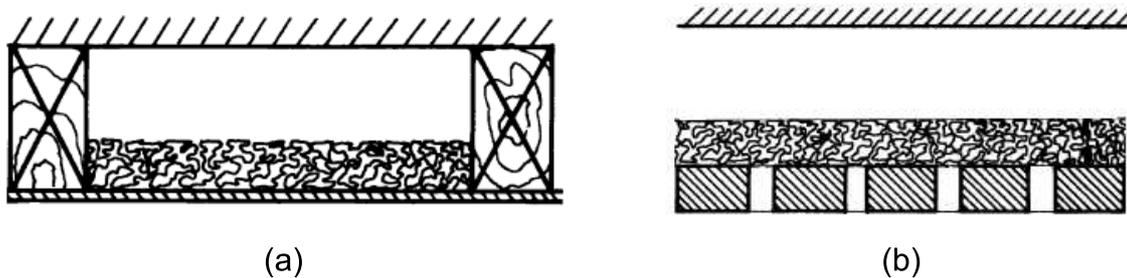
O funcionamento deste sistema se dá com a utilização do ar, dentro da cavidade do painel, como elemento mola, podendo haver adição de material poroso para maior absorção, e a superfície exposta como massa. Neste sistema, ao se alterar a massa do elemento vibrante e a espessura da camada de ar a frequência de ressonância, ponto em que a absorção sonora é máxima, pode ser regulada. Apesar de sua grande capacidade de absorção nas bandas de frequência desejadas, a face do painel exposta ao campo sonoro acaba por refletir eficientemente as demais faixas de frequência, necessitando de atenção ao projetista (BLAUERT; XIANG, 2009; COX; D'ANTONIO, 2017; KUTTRUFF, 2017; THOMAZELLI; BERTOLI, 2019).

Esta solução para absorção sonora pode ser do tipo de membrana, ilustrado pela Figura 4a, na qual a superfície exposta do painel é constituída por uma fina membrana que possua baixíssima rigidez e alto amortecimento interno. Neste caso, podem ser utilizados painéis constituídos por ligas metálicas, polímeros ou madeira, instalados a certa distância de uma superfície altamente reflexiva, a qual

determinará, em conjunto com as propriedades da membrana, sua frequência de ressonância (VIGRAN, 2008; COX; D'ANTONIO, 2017).

Outra opção é o painel ressonante do tipo Helmholtz, ilustrado pela Figura 4b, o qual é constituído de uma placa perfurada e suas frequências de eficiência e ressonância são determinadas a partir da composição da porcentagem de perfurações, espessura da placa e profundidade da cavidade de ar (QIU, 2016; COX; D'ANTONIO, 2017).

Figura 4 – Ressonador de (a) membrana e (b) de Helmholtz, ambos com material absorvente fibroso e em frente a elemento reflexivo



Fonte: Adaptado pelo autor de Blauert e Xiang (2009)

2.1.4.3 Absorvedores porosos

Estes são elementos importantes do ponto de vista da facilidade e praticidade de aplicação para o tratamento acústico, podendo ser constituídos, a partir de materiais fibrosos ou porosos, que são comprimidos, ou extrudados, de modo a formarem seções de lã ou placas (BLAUERT; XIANG, 2009).

São fixados nos tetos e paredes, em função do apelo estético e garantia da funcionalidade do espaço, agindo na redução do número de reflexões das ondas sonoras. Desta forma, o propósito deste tipo de material é o de ajustar a intensidade e o espectro das ondas sonoras refletidas no ambiente, garantindo que apenas uma fração controlada da energia sonora será refletida novamente para o ambiente, de maneira a proporcionar condições ideais para o ouvinte (VIGRAN, 2008; BARRETT; ZHANG, 2009; LECHNER, 2012; KLEINER; TICHY, 2014; KUTTRUFF, 2017).

São classificados como materiais poro-elásticos, divididos em fase sólida, sendo a estrutura do material, e líquida, geralmente ocupada pelo ar. Neste caso, a absorção sonora é atingida pelo fato de que o ar é um fluido, sendo a energia das ondas sonoras dissipada entre seus poros, transformando o movimento molecular

organizado, presente na onda incidente, em um movimento aleatório, ocorrendo por um número infinito de reflexões internas. Isto ocorre pela fricção do ar entre suas camadas e mudança de direção da onda entre os poros, além de perda de inércia do movimento ao se variar a capacidade de fluxo e troca térmica do ar com o material (SAGARTZAZU; HERVELLA-NIETO; PAGALDAY, 2008; POHL, 2011; KLEINER; TICHY, 2014; KUTTRUFF, 2017).

Estes possuem a capacidade de absorver apenas a fração da energia contida na onda sonora incidente que não é refletida por sua camada superficial o que evidencia a necessidade de que a superfície exposta tenha baixa capacidade reflexiva. Essencialmente, a fração de energia da onda sonora incidente que penetra no material deve ser dissipada antes que retorne para a superfície, efetuando o caminho através do material, até um elemento rígido por trás, e voltando, tendo sua energia reduzida. Assim, este deve possuir espessura suficiente para a faixa de frequências de interesse visto que a energia pode retornar ao campo sonoro, pela mesma superfície atingida pelo som incidente, caso esteja mal dimensionado (ATTENBOROUGH; VÉR, 2006).

De modo geral, são usualmente constituídos por fibras, podendo estas serem orgânicas, químicas ou metálicas, e devem possuir uma seção transversal pequena em relação ao seu comprimento, resultando em flexibilidade aliada à alta resistência. Os materiais fibrosos são fabricados a partir de matéria prima virgem e/ou reciclada e podem ser classificados em duas categorias: fibras naturais, advindas de plantas e animais, e fibras minerais e químicas, como as sintéticas, semissintéticas e regeneradas, proporcionando uma ampla gama de aplicações (KOIZUMI; TSUJIUCHI; ADACHI, 2002; MAMTAZ et al., 2016; IANNACE, 2017; OTHMANI et al., 2017; LIM et al., 2018; BERTOLINI et al., 2019; RUBINO et al., 2019).

Produtos comumente utilizados para absorção sonora são provenientes de fibras minerais, de vidro ou de rocha, possuindo fibras com diâmetro de 2-20 μm mas comumente utilizadas na faixa de 4-10 μm . Devido ao método de fabricação, estas são orientadas de forma anisotrópica e paralelas ao sentido do comprimento da seção, resultando em um produto final em forma de manta ou de placa. Para este tipo de produto, também existem opções confeccionadas a base de fibras sintéticas, em poliéster, possuindo diâmetro de 20-50 μm , e comprimento de 55 mm. A Tabela 2 exemplifica os coeficientes de absorção sonora destes materiais em suas

composições mais usuais (ATTENBOROUGH; VÉR, 2006; VIGRAN, 2008; KUTTRUFF, 2017).

Tabela 2 – Coeficientes de absorção sonora de absorvedores porosos

Material	Coeficiente de absorção sonora (α_s)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Lã de vidro de 25 mm e 1,5 kg/m ² com revestimento em PVC micro perfurado	0,08	0,43	0,79	1,00	0,82	0,58
Lã de vidro de 75 mm e 2,0 kg/m ² revestido em véu de fibra de vidro	0,20	0,72	0,95	1,0	0,95	0,99
Lã de PET de 20 mm e 0,40 kg/m ²	0,18	0,25	0,40	0,54	0,62	0,58
Lã de PET de 40 mm e 1,00 kg/m ²	0,16	0,37	0,52	0,72	0,63	0,70
Lã de PET de 50 mm e 1,50 kg/m ²	0,18	0,43	0,71	0,86	0,81	0,62
Lã de PET de 60 mm e 1,60 kg/m ²	0,19	0,45	0,72	0,85	0,62	0,65
Lã de PET de 75 mm e 1,50 kg/m ²	0,19	0,59	0,75	0,89	0,81	0,75
Lã de PET de 100 mm e 1,00 kg/m ²	0,16	0,39	0,61	0,77	0,80	0,64

Fonte: Adaptado pelo autor de Del Rey et al. (2011), Klippel Filho et al. (2017) e Saint-Gobain (2019cd)

Sua eficiência é relacionada à estrutura, ponto em que a quantidade de energia sonora dissipada pode ser maximizada por uma série de alterações nas propriedades destes materiais. Inúmeras aproximações vêm sendo desenvolvidas para a estimativa de desempenho destes materiais, porém, seus resultados são imprecisos devido à variedade de formas da rede de poros e natureza das fibras utilizadas para fabricação destes. Sendo assim, apesar de seus fatores físicos influenciarem na capacidade do material em absorver as ondas sonoras, a modificação destes não resulta em uma relação direta de mudança de desempenho (FUCHS, 2013; OLIVA; HONGISTO, 2013; QIU, 2016; BRAVO; MAURY, 2018).

Todavia, estas características podem ser descritas como:

- Espessura das mantas: se a impedância do material da superfície das estruturas fibrosas for mantida nas camadas interiores, as ondas sonoras não serão refletidas para o ambiente, logo quanto maior a espessura total maior é a capacidade de absorção. Para que esta condição de eficiência seja atingida, a espessura do material deve ser de, ao menos, um décimo do comprimento de onda incidente, evidenciando a necessidade de grandes espessuras para absorção em

baixas frequências (aproximadamente 0,35 m para 100 Hz). Ainda, pelo fato das diferenças de pressão ocorrerem em intervalos menores de tempo com o aumento das frequências, sua eficiência aumenta com as frequências, possuindo alta absorção nas médias e altas frequências. Por fim, um aumento na absorção sonora nas bandas de baixa frequência é esperado com o aumento da espessura da camada de material (BARRON, 2003; LECHNER, 2012; NEWELL, 2012; ERMANN, 2015; EVEREST; POHLMANN, 2015; QIU, 2016; COX; D'ANTONIO, 2017; DUNNE; DESAI; SADIKU, 2017);

- Tamanho das fibras: os coeficientes de absorção sonora sofrem aumento com a diminuição do diâmetro das fibras pelo fato de que fibras mais finas tem maior facilidade para se deformar e amortecer as ondas sonoras. A utilização de fibras mais finas também faz com que o caminho a ser percorrido pela onda sonora seja mais tortuoso e a porosidade diminua. Isto aumenta a resistência ao fluxo de ar, por meio da fricção e viscosidade associadas à vibração do ar, resultando em maiores coeficientes de absorção sonora (SUN; BANKS-LEE; PENG, 1993; KOIZUMI; TSUJIUCHI; ADACHI, 2002; LEE; JOO, 2003; YILMAZ et al., 2011; DUNNE; DESAI; SADIKU, 2017);
- Resistividade ao fluxo de ar e porosidade: a porosidade e a resistividade ao fluxo de ar do material são características comumente associadas. Tal relação não possui linearidade com a absorção sonora, fazendo com que a sua previsão, a partir destes parâmetros, seja imprecisa. Isto pode ser evidenciado no estudo de Suvari, Ulcay e Pourdeyhimi (2015), em que uma maior absorção sonora era esperada para lãs de maior resistividade, devido à presença de maior número de fibras no caminho do fluxo de ar, o que não foi verificado, visto que amostras com menor número de fibras, porém, mais espessas, obtiveram resultados de absorção sonora superiores. Desta forma, uma boa capacidade de absorção é esperada de materiais com alta porosidade, porém, não há correlação direta para sua previsão (COX; D'ANTONIO, 2017; QIU, 2016; KUTTRUFF, 2017);
- Densidade: quanto maior for a densidade, maior será o número de fibras dispostas por unidade de área, aumentando a perda de energia

das ondas sonoras pela adição de mais fricção. Um acréscimo de densidade, mantendo a mesma espessura, resulta em aumento de absorção sonora nas médias e altas frequências. Isto ocorre apenas até certo ponto, visto que altas densidades reduzem o desempenho, pois a porosidade diminui e o material assume, em determinadas faixas de frequência, o comportamento de superfícies reflexivas. Já no caso de uma manta de menor densidade e com estrutura dos poros mais aberta é esperado um melhor desempenho em baixas frequências. Porém, novamente, sendo benéfico até certo ponto, visto que densidades muito baixas implicam em grande distanciamento entre as fibras, prejudicando a capacidade de absorção sonora do material (KOIZUMI; TSUJIUCHI; ADACHI, 2002; SEDDEQ, 2009; NEWELL, 2012; EVEREST; POHLMANN, 2015; DUNNE; DESAI; SADIKU, 2017);

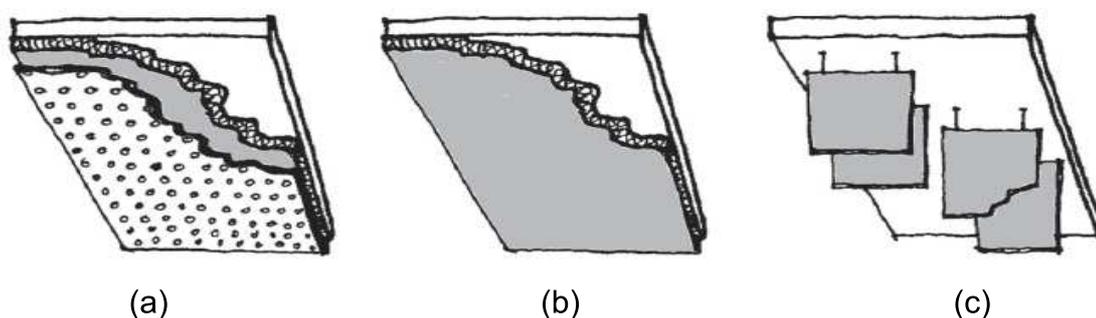
- Tortuosidade: consiste na quantidade de obstrução, causada pela irregularidade da matriz interna do material, promovida enquanto as partículas de ar passam entre os espaços dentro do meio fibroso. O formato e arranjo da rede de poros causa mudança de volume no meio além de aumentar o comprimento do caminho a ser percorrido pelas ondas sonoras entre as fibras. Assim, são aumentadas as perdas viscosas que o ar sofre ao passo que as ondas sonoras são redirecionadas pelas pequenas passagens do material ao continuar sua propagação. Neste caso, quanto maior a tortuosidade mais absorção sonora é esperada (ATTENBOROUGH; VÉR, 2006; MÖSER, 2009; NEWELL, 2012);
- Posicionamento em relação à superfície reflexiva: considerando as características acima, quanto maior for a velocidade da partícula de ar maior será a capacidade de absorção do material, tornando o material ineficiente caso esteja fixado diretamente sobre uma superfície reflexiva. Isto se dá pelo fato de que quando a onda sonora for refletida, exatamente no seu plano de reflexão, ponto em que ocorre a mudança de direção, a pressão será máxima, mas sua velocidade será zero. Desta forma, de maneira a proporcionar o maior aproveitamento da capacidade de absorção do material, principalmente em baixas frequências, este deve ser posicionado a uma determinada distância

desta superfície. Havendo casos em que se deseja maior absorção sonora em bandas de frequência específicas, o material deve ser posicionado, em relação à superfície reflexiva, a um quarto do comprimento de onda de interesse (KANG, 2002; NEWELL, 2012; KLEINER; TICHY, 2014; COX; D'ANTONIO, 2017).

O acabamento destes materiais pode ser cru, revestido por painéis lisos, ou perfurados, ou por meio do uso de tecidos. Estes últimos conferem a textura e cor desejadas, variando sua influência em relação à absorção sonora original do material em função de sua porcentagem de transparência. Quanto menor sua transparência maior será a perda de absorção nas bandas de média e alta frequência podendo haver pequeno aumento nas baixas frequências (COX; D'ANTONIO, 2017).

Frente aos modos de instalação, ilustrados pela Figura 5, estes podem ser fixados em frente a superfícies reflexivas (painéis), como tetos e paredes, com ou sem camada de ar. Também podem ser pendurados, na horizontal, recebendo o nome de nuvens, ou na vertical, chamados *baffles* ou *banners* (grandes comprimentos), devendo possuir espaçamento maior do que sua altura para que um elemento não mascare o outro (EGAN, 2007; MOMMERTZ, 2008; SZYMANSKI, 2008; COX; D'ANTONIO, 2017).

Figura 5 – Modos de fixação: (a) e (b) painéis - diretamente em paredes ou tetos, (c) *baffles* e *banners*

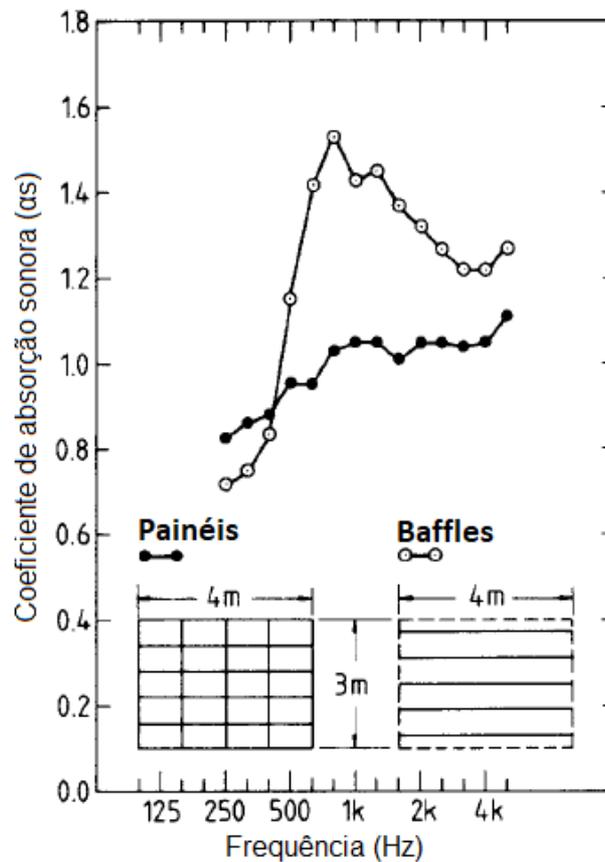


Fonte: Adaptado pelo autor de Ermann (2015)

Neste caso, o tipo de configuração adotada no uso destes materiais absorventes tem grande influência em sua capacidade de absorção sonora. Ao exemplo da sua orientação em relação à superfície reflexiva mais próxima, sendo que a montagem destes paralelos à superfície (painéis) ou perpendiculares (*baffles* e *banners*), resulta em diferentes resultados, mesmo quando do uso do mesmo

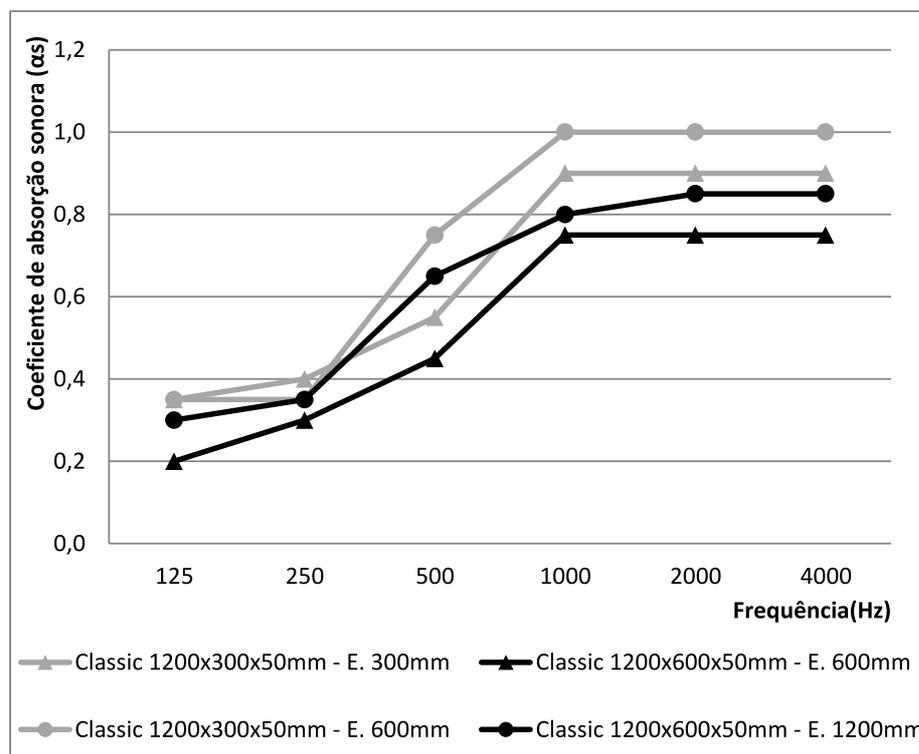
material em mesma quantidade. Esta diferença pode ser verificada na Figura 6, que ilustra resultados obtidos com métodos padronizados em câmara reverberante, na qual os *baffles* atingiram coeficientes de absorção sonora consideravelmente maiores, principalmente nas bandas de média frequência, que os painéis em todas as bandas de frequência de média e alta frequência, evidenciando os ganhos possibilitados pela modificação do modo de instalação (COPS, 1985; KANG, 2002).

Figura 6 – Coeficiente de absorção sonora de 20 seções de 100x60x5 cm de manta de lã de rocha na configuração de painéis e *baffles*



Fonte: Adaptado pelo autor de Cops (1985)

De acordo com Pohl (2011), a absorção sonora dos *baffles* é função de uma combinação da área total de material empregada na sala e o espaçamento entre as fileiras do sistema. Logo, a partir de dados fornecidos em catálogos de fabricantes como Knauf-AMF (2019), presentes na Figura 7, é possível a verificação da influência do espaçamento na absorção sonora nos mesmos tipos de sistema, sendo estes compostos por *baffles* em lã de vidro revestidos por filme com função de retardo de chamas.

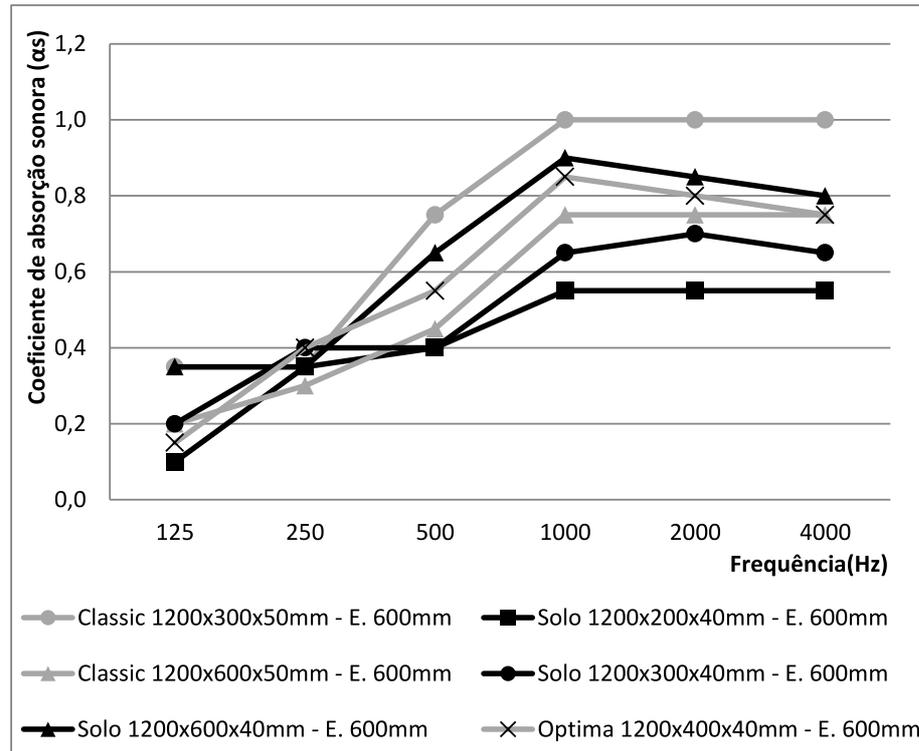
Figura 7 – Influência do espaçamento de *baffles* de diferentes alturas

Fonte: Adaptado pelo autor de Knauf-AMF (2019)

Neste caso, para as duas composições de altura, exceto para a banda de frequência de 250 Hz nos *baffles* de 300 mm de altura, ganhos em absorção sonora podem ser verificados em todas as bandas de frequência quando a distância entre os sistemas foi aumentada para o dobro da altura das seções do material. Ainda, na maioria das bandas de frequência analisadas, os *baffles* de menor altura e menor espaçamento, mesmo quando na mesma condição de espaçamento (600 mm), foram os que obtiveram os melhores resultados de absorção sonora.

Ainda, além da verificação da influência do espaçamento entre as fileiras de *baffles*, de modo a visualizar o impacto da diferença de altura dos *baffles* na absorção sonora, dados de produtos, também em lã de vidro com revestimento para retardo de chamas, dos fabricantes Knauf-AMF (2019), Armstrong (2020) e Ecophon (2020), estão presentes na Figura 8 para um mesmo espaçamento de 600 mm entre as peças.

Figura 8 – Influência da altura de *baffles* em mesmas condições de espaçamento



Fonte: Adaptado pelo autor de Knauf-AMF (2019), Armstrong (2020) e Ecophon (2020)

Com a mesma condição de espaçamento, de 600 mm, os *baffles* do modelo Classic, de mesma espessura, obtiveram redução na absorção sonora quando sua altura foi aumentada de 300 mm para 600 mm. Com comportamento contrário, os produtos de modelo Optima e Solo, também com mesma espessura, aumentaram sua capacidade de absorção sonora com o acréscimo de altura entre os sistemas. Ainda, comparando os modelos Classic e Solo, de mesma seção e espaçamento, variando apenas a espessura dos *baffles*, os produtos de altura 300 mm tiveram um comportamento conforme esperado para materiais fibrosos, com aumento de absorção sonora com o aumento da espessura. Isto não ocorreu nos sistemas de 600 mm de altura, situação em que as seções de menor espessura resultaram em maiores coeficientes de absorção sonora, indo na direção contrária das previsões.

Ainda, o fabricante Kinetics (2020), com seu produto KB803, também em lã de vidro e com revestimento em filme para retardo de chamas, com dimensões de 1200x600x38 mm e espaçamento de 600 mm, fornece dados de absorção sonora acima de 1,50 nas bandas de frequência de 500 a 2000 Hz, sendo resultados que destoam demais para comparação com os demais produtos similares supracitados.

Desta forma, fica evidente a variabilidade de aplicação deste tipo de sistema vide os resultados fornecidos pelos fabricantes dos produtos disponíveis no mercado. Existe diferença no desempenho dos sistemas quando suas características e composições são alteradas, mesmo com amostras de composição similar e metodologias de ensaio padronizadas na ISO 354 (ISO, 2003), necessitando de estudos mais aprofundados, com amostras do mesmo fabricante, variando sua geometria e condições de instalação.

2.2 O POLI(TEREFTALATO DE ETILENO): PET

O poli(tereftalato de etileno), comumente chamado pela sigla PET, foi descoberto por Whinfield e Dickson e patenteado pela DuPont em 1949, o qual é classificado como um poliéster saturado termoplástico. Este possui boas propriedades mecânicas em temperaturas de até 160 °C, sendo transparente, impermeável a água e dióxido de carbono, tem boa resistência mecânica, é fácil de moldar, unir e esterilizar, proporcionando seu reuso. Ainda, quando a finalidade inicial de uso do produto chega ao fim este pode ser reciclado por meio de uma série de processos. Este material compete com o vidro, acrílico, poliestireno e policarbonato, sendo muito atrativo para produção de garrafas, pois demanda menos energia para produção e é mais leve, demandando menos combustível no transporte (ASHBY; JOHNSON, 2014; WYPYCH, 2016).

2.2.1 Composição e produção

Os poliésteres são polímeros obtidos pela reação de condensação de reagentes disfuncionais, sendo caracterizados pela presença de ésteres ao longo de sua cadeia, e são fabricados a base de recursos químicos encontrados, principalmente, no petróleo. São obtidos por meio da reação de esterificação entre o ácido tereftálico e etileno glicol, com água como um produto secundário, e pela reação de transesterificação entre o etileno glicol e o tereftalato de dimetila, com metanol como produto secundário. Assim, o PET é um poliéster linear parcialmente aromático com a repetição de $C_{10}H_8O_4$ em sua estrutura química, sendo sinterizado em duas etapas, a prepolimerização, na qual é realizada a reação de esterificação e

a transesterificação, seguido pela etapa de policondensação (KAJIWARA; OHTA, 2009; LEPOITTEVIN; ROGER, 2011).

Dependendo de seu modo de processamento e exposição térmica, este polímero pode ser transparente, em seu estado amorfo, ou translúcido, em seu estado semi-cristalino, adquirindo propriedades rígidas, ou semi-rígidas, sendo função da espessura do produto. A temperatura de fusão do material varia de 245 a 265 °C e possui aumento de sua temperatura de transição vítrea de 67 °C, em condição amorfa, para 81 °C, em estado semi-cristalino, e 125 °C em estado cristalino e orientado. Desta forma, o PET é um polímero semi-cristalino com estrutura triclinica, a qual é obtida de forma lenta, sendo que, caso este seja rapidamente resfriado, durante sua produção, assume o estado amorfo (LEPOITTEVIN; ROGER, 2011; WYPYCH, 2016).

Em relação à sua estabilidade, a solubilidade e resistência são boas para ácidos fracos, combustíveis, halógenos e cetonas, ruim para ácidos fortes, álcalis e hidrocarbonetos aromáticos, e excelente para solventes orgânicos. Este pode ser degradado por sua sensibilidade à hidrólise, a qual ocorre em temperaturas acima da sua transição vítrea, mesmo sem a presença de oxigênio, e é agravado em condições úmidas e/ou ácidas (LEPOITTEVIN; ROGER, 2011).

Pela sua boa estabilidade térmica e fluidez quando derretido, uma variedade de materiais e objetos pode ser obtida pelo processamento do PET, devendo a produção ser precedida de um cauteloso processo de secagem para evitar a degradação via hidrólise. Seus processos de beneficiamento são caracterizados por extrusão e moldagem por injeção ou sopro, resultando em produtos como filmes, garrafas, vasilhames e fibras. As fibras, especificamente, são obtidas por meio do processo de extrusão, sendo formadas pelo transporte do PET, em estado líquido, por um bico, passando diretamente para o estado sólido via resfriamento. Ainda, estas podem receber uma adição de outro polímero, que lhe confira propriedades térmicas ou mecânicas, sendo classificadas como fibras bicomponente (LEPOITTEVIN; ROGER, 2011; WYPYCH, 2016).

De modo geral, o PET cresceu rapidamente no mercado nas últimas décadas, se tornando o material de escolha para diversas aplicações, sendo o quarto polímero mais produzido, considerando o cenário mundial, ficando atrás do polietileno (PE), polipropileno (PP) e policloreto de vinila (PVC). Estes quatro polímeros possuem, para sua produção, emissão anual de dióxido de carbono na atmosfera em

quantidade similar, estando na mesma faixa da produção de vidro e levemente abaixo das emissões provenientes da fabricação de ligas metálicas. A energia incorporada do PET, a qual se assemelha a maioria dos polímeros, é bastante elevada, estando na ordem de 100 MJ/kg, em oposição aos 20 MJ/kg para a produção de vidro (THOMAS; VISAKH, 2011; ASHBY; JOHNSON, 2014).

2.2.2 Descarte e reciclagem

A dependência da humanidade em recursos naturais não renováveis cresceu exponencialmente nos últimos séculos, atingindo a marca de 96% de dependência de materiais não renováveis, impactando no meio ambiente, sendo parte desta causada pela fabricação, uso e descarte de produtos. No ponto de vista do descarte, a administração dos resíduos sólidos permanece sendo uma das áreas negligenciadas dentro do desenvolvimento urbano, o que impacta diretamente no aspecto sustentável dos meios de gestão (ASHBY, 2013; SILVA; SANTOS; SILVA, 2013; MWANZA; MBOHWA, 2017; YHAYA; TAJARUDIN; AHMAD, 2018).

Em relação ao seu impacto ambiental, produtos em PET, como garrafas de bebidas e embalagens, se tornam um sério problema ao meio ambiente pelo fato de que a sua biodegradação é na ordem de 500 a 700 anos. Assim, caso sejam dispostos de forma imprópria, estes podem causar entupimento nos sistemas de drenagem urbanos, causando alagamentos, além de que ao serem transportadas aos rios e mares são ingeridos por animais de pequeno e grande porte (LEPOITTEVIN; ROGER, 2011).

Desta forma, soluções como a incineração, encaminhamento para aterros e reciclagem são levantadas. A primeira é válida ao diminuir o montante de resíduo a ser encaminhado para deposição, mas não soma ao bem estar ambiental, visto que emite gases tóxicos na atmosfera, aumentando a poluição do ar. A segunda não é interessante pela possibilidade de contaminação do solo, por acidentes ou má estruturação dos aterros, além de ocupação de grandes áreas e indisponibilidade do material para reuso. Desta forma, a reciclagem, química ou termomecânica, é a melhor solução, utilizando os resíduos como matéria prima para novos produtos, sendo que, dentre as mais variadas aplicações dos flocos de PET reciclados, cerca de 72% do material é transformado em fibras para o setor têxtil (KARAYANNIDIS;

ACHILIAS, 2007; NOONE, 2008; ASHBY, 2013; BARMAN; BHATTACHARYA; MANDOT, 2015; GEYER; LORENZ; KANDELBAUER, 2016).

Considerando a reciclagem termomecânica, para servir de insumo para novos produtos, esta pode consistir na transformação de garrafas de bebidas em pellets, passando pelo processo de retirada manual das tampas e rótulos para remover elementos de PVC e PEAD. Neste caso as garrafas são então encaminhadas para um moinho responsável por cortá-las em pequenos flocos. Estes flocos são lavados por jatos de água, banho de água com hidróxido de sódio e detergente, a 80 °C, e água gelada, de modo a garantir a remoção de impurezas. Assim, com o material reduzido e limpo, este pode ser encaminhado para máquinas extrusoras, ou de fiar por fusão, as quais operam na temperatura de fusão do material, para formação de pellets ou fibras (BARMAN; BHATTACHARYA; MANDOT, 2015).

Independentemente do método, a reciclagem de PET pode ser considerada como uma das mais bem sucedidas e alastradas dentro da reciclagem de materiais, estando atrás somente da reciclagem de alumínio. Neste caso, quando considerada para fabricação de fibras, o consumo energético é reduzido em cerca de 80%, além de consumir 40% menos água e emitir menos de 30% de dióxido de carbono na atmosfera quando comparado com a utilização de matéria prima virgem. Desta forma, sua reciclagem possui o potencial de redução do uso de petróleo bruto, energia, menores emissões de dióxido de carbônico e menor volume de aterros, além de agregar sustentabilidade à cadeia de produção (SCHEIRS, 1998; KARAYANNIDIS; ACHILIAS, 2007; LEPOITTEVIN; ROGER, 2011; MWANZA; MBOHWA, 2017).

No Brasil, de acordo com o 10º Censo da Reciclagem do PET (ABIPET, 2016), as empresas atuantes na reciclagem do PET se mostram amadurecidas, sendo que 92% destas atuam na área a pelo menos 5 anos. Neste mercado, 65% destas mostram descontentamento com os valores praticados na reciclagem deste resíduo, refletindo no cenário de que dois terços não planejam novos investimentos em suas plantas, dada a ociosidade de parte de sua capacidade produtiva. Ainda, a baixa econômica do país causou uma redução de quase 50% na produção de setores têxtil, químico, automotivo e de transportes. Isto impactou na demanda por parte dos consumidores do PET reciclado, seja em flocos, granulado ou em fardos, reduzindo o montante reciclado nos últimos anos, atingindo a marca de 274.000 toneladas recicladas em 2015, representando 51% do total descartado.

2.2.3 Mantas de lã de PET

Um dos problemas corriqueiros na área da acústica de salas é o projeto de sistemas para absorção sonora que possuam o desempenho desejado, em função das bandas de frequência de interesse, devendo ser eficientes em relação ao seu tamanho, custo, periculosidade e impacto ambiental. Isto faz com que o projetista deva escolher com aptidão o material absorvente, a geometria do sistema e seu material de revestimento, buscando sempre o melhor equilíbrio entre tais aspectos (ATTENBOROUGH; VÉR, 2006).

Desta forma, em comparação com materiais consagrados no mercado, as novas tendências, como o uso de materiais naturais e materiais artificiais compósitos, resultam na utilização de materiais mais ecológicos, degradáveis, recicláveis e aplicáveis em variados tipos de uso. Assim, estes possuem maior atratividade em relação ao seu impacto ambiental, fazendo com que sua prospecção de uso seja da ocupação de uma posição mais considerável no mercado ao passo em que mais pesquisas são realizadas e a produção aumentar ao longo dos anos (ARENAS; CROCKER, 2010; GHOTBI et al., 2015; CAO et al., 2018).

Assim, mantas têxteis a base de fibras de PET recicladas se tornam atrativas pelo uso de resíduos de um material não renovável e de grande potencial poluidor ao meio ambiente. Estas são classificadas como nãotecidos, feitas a base de fibras sintéticas, possuindo processos de fabricação que tornam o produto atrativo, sendo comumente efetuado por uma cadeia contínua de processos. O resultado é um custo operacional inferior pela minimização de transporte entre os processos e alto nível de automação da planta. O produto resultante é anisotrópico em termos de sua estrutura e propriedades, sendo altamente poroso e permeável, possuindo orientação, separação e pontos de ligação das fibras fortemente dependentes da combinação e regulagem dos processos de fabricação (RUSSELL; SMITH, 2016; SINGH; MUKHOPADHYAY, 2016).

2.2.3.1 Método de fabricação

De modo a simplificar os processos, a fabricação destas pode ser convenientemente dividida em dois estágios, sendo que o primeiro consiste na preparação de um véu, ou manta, formada por camadas de fibras, a qual é unida por

meio de um método de ligação. Neste caso, a formação da manta de fibras é tradicionalmente referida como *drylaying* (via seca), obtida por meio de processos de cardagem ou deposição aerodinâmica, ou *wetlaying* (via úmida), na qual há a dispersão aquosa das fibras, e técnicas de *spunbond* e *meltblowing*. Sendo o segundo estágio caracterizado pela consolidação das fibras por meio de processos mecânicos, térmicos, ou químicos (POURMOHAMMADI, 2013; RUSSELL; SMITH, 2016; ABNT, 2017a).

O processo comumente utilizado é o *drylaying* seguido por consolidação térmica pela passagem de fluxo de ar quente. Para tal, fibras de poliéster são utilizadas, possuindo duas composições distintas, devendo passar em máquinas, individualmente, responsáveis por abrir as fibras, visto que estas são fornecidas em fardos comprimidos, e por um misturador, responsável por controlar e homogeneizar a mistura dos dois tipos de fibras. Em sequência, as fibras abertas e misturadas são encaminhadas para a cardagem, sendo o processo que forma o véu de fibras utilizando uma, ou mais, cardas. Estas são responsáveis por trabalhar as fibras entre superfícies que possuem dentes, separando, limpando e paralelizando as fibras em uma orientação longitudinal, encaminhando o produto para um dobrador de véu (RUSSELL; SMITH, 2016; ABNT, 2017a).

Neste equipamento o véu é dobrado pela máquina, a qual dispõe sucessivas camadas de manta sobre uma esteira, em movimento, ortogonal ao processo inicial, resultando em uma formulação em ziguezague. Esta etapa é responsável pelo ajuste da altura e densidade do material, previamente à consolidação, sendo função da velocidade de operação do dobrador e da esteira. Usualmente a velocidade da esteira, na qual o véu é transportado entre as máquinas, é baixa, promovendo a disposição de várias camadas de véu de baixa espessura, as quais formam uma manta de grande espessura, resultando em uma maior homogeneidade do material (RUSSELL; SMITH, 2016).

Em sequência, o véu é encaminhado para a fase de termoligação, a qual promove a ligação das fibras por meio de seu amolecimento e resfriamento, produzindo uma ligação aderente. Este processo utiliza uma fibra bicomponente, possuindo interior em poliéster de maior ponto de fusão, revestido por outro de ponto de fusão mais baixo, responsável por fazer a ligação de sua fibra interior com a outra fibra da mistura, também de maior ponto de fusão. Assim, o véu formado pela fibra de poliéster e a bicomponente passam por dentro de um forno com passagem de ar

quente, no qual o objetivo é realizar um rápido e homogêneo aquecimento da manta até o ponto de derretimento do revestimento da fibra bicomponente. Neste caso, uma aderência adequada pode ser obtida por meio da utilização de fibras bicomponente de CoPET. O PET modificado que reveste a fibra tem temperatura de fusão de 100 a 110 °C, em oposição aos 265 °C de seu interior, em PET, devendo possuir proporção conforme a Tabela 3 (POURMOHAMMADI, 2007; MAO; RUSSELL; POURDEYHIMI, 2007; RUSSELL; SMITH, 2016).

Tabela 3 – Proporção e características para utilização de fibra bicomponente em CoPET/PET

Parâmetro	Característica do nãotecido		
	Macio	Médio	Rígido
Porcentagem de fibra bicomponente (%)	10–20	15–30	>30
Temperatura de fusão/ligação (°C)	140–150	150–160	160–180
Finura da fibra (dtex)	1,7–3,3	3,3–6,7	>6,7

Fonte: Adaptado pelo autor de Pourmohammadi (2007)

2.2.3.2 Propriedades acústicas

Em estudo realizado por Patnaik et al. (2015), foram desenvolvidas mantas a base de nãotecidos, confeccionados por meio de consolidação mecânica com uso de agulhadeiras. Foram avaliadas composições de 50/50 de fibras bicomponente de PET recicladas revestidas em silicone e fibras de algodão. Além de uma mistura de 50/50 de fibra bicomponente de PET com fibras de lã de ovelha. Resultando em mantas com espessura de 16 e 17 mm, respectivamente, com densidade de 1 kg/m². Estas tiveram sua absorção sonora avaliada por meio de um tubo de impedância, no qual a composição de PET e lã de ovelha obteve melhores resultados em todas as bandas de frequência. Todavia, os materiais obtiveram coeficientes de absorção sonora consideráveis nas bandas de alta frequência, se aproximando de 0,50, modestos nas médias frequências, e bem reduzidos nas baixas frequências.

No trabalho desenvolvido por Lee e Joo (2003), foram analisadas mantas, por meio de um tubo de impedância, fabricadas com fibra de poliéster de baixa

temperatura de fusão (130 °C), avaliando a influência do uso de fibras de diferentes diâmetros e de mesmo comprimento. As mantas foram obtidas por meio da orientação mecânica a seco e consolidação térmica e não tiveram suas espessuras discriminadas. O estudo avaliou a influência de diferentes combinações de quantidade de fibra de baixa temperatura de fusão com fibras de PET de maior diâmetro e concluiu que altas porcentagens de uso de fibra de baixa temperatura de fusão resultam em menores coeficientes de absorção. O motivo para esta ocorrência se dá pelo fato de que seções de manta perderam a porosidade pelo derretimento de tais fibras, as quais formaram uma superfície única, sendo a proporção de 50/50 a que obteve os resultados mais elevados.

Por fim, considerando a análise de Küçük e Korkmaz (2012), a qual efetuou a medição dos coeficientes de absorção sonora, em tubo de impedância, em várias composições de fibras de PET, fibras de baixa temperatura de fusão, fibras de algodão, de acrílico, de PET bicomponente e poliamida. Os melhores resultados foram obtidos por composições de 70% de lã de ovelha e 30% de fibra de PET bicomponente, consolidadas por processo térmico, com espessuras de 16,35 e 35,38 mm, obtendo resultados elevados nas bandas de média e alta frequência. As composições de 90% PET com 10% de fibra de baixa temperatura de fusão, consolidadas termicamente, e composições de 100% PET, consolidadas mecanicamente, foram avaliadas em espessuras de 0,23 a 7,34 mm. Estas obtiveram coeficientes de absorção sonora abaixo de 0,35 em todas as bandas de frequência, evidenciando a baixa aplicabilidade e carência de desempenho de produtos com espessura reduzida.

De modo geral, os trabalhos supracitados, em conjunto com os de Kosuge, Takayasu e Hori (2005), Lou, Lin e Su (2005), Yang e Yu (2011), Seddeq et al. (2012), Hassan e Rus (2013), Huang, Lin e Chuang (2014), Rabbi et al. (2014), Çelikel e Babaarslam (2017), mostram o potencial de absorção sonora de diversas composições de mantas de poliéster, porém, em amostras de baixa espessura. Ainda, as avaliações foram feitas em tubo de impedância, evidenciando a escassez de estudos nesta área, com espessuras comerciais do material e avaliações em tamanho real em câmaras reverberantes. Tais condições são encontradas apenas em alguns trabalhos, como os de Del Rey et al. (2011) e Klippel Filho et al. (2017), nos quais mantas de lã de PET, sem especificação da composição de fibras e método de consolidação, foram ensaiadas em câmaras reverberantes e em

espessuras usualmente aplicadas em sistemas de tratamento acústico, resultando em desempenho considerável, conforme resultados expressos pela Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de absorção sonora de mantas de lã de PET

Material	Coeficiente de absorção sonora					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Manta de lã de PET de 20 mm e 0,4 kg/m ²	0,18	0,25	0,40	0,54	0,62	0,58
Manta de lã de PET de 40 mm e 1,0 kg/m ²	0,16	0,37	0,52	0,72	0,63	0,70
Manta de lã de PET de 50 mm e 1,5 kg/m ²	0,18	0,43	0,71	0,86	0,81	0,62
Manta de lã de PET de 60 mm e 1,6 kg/m ²	0,19	0,45	0,72	0,85	0,62	0,65
Manta de lã de PET de 75 mm e 1,5 kg/m ²	0,19	0,59	0,75	0,89	0,81	0,75
Manta de lã de PET de 100 mm e 1,0 kg/m ²	0,16	0,39	0,61	0,77	0,80	0,64

Fonte: Adaptado pelo autor de Del Rey et al. (2011) e Klippel Filho et al. (2017)

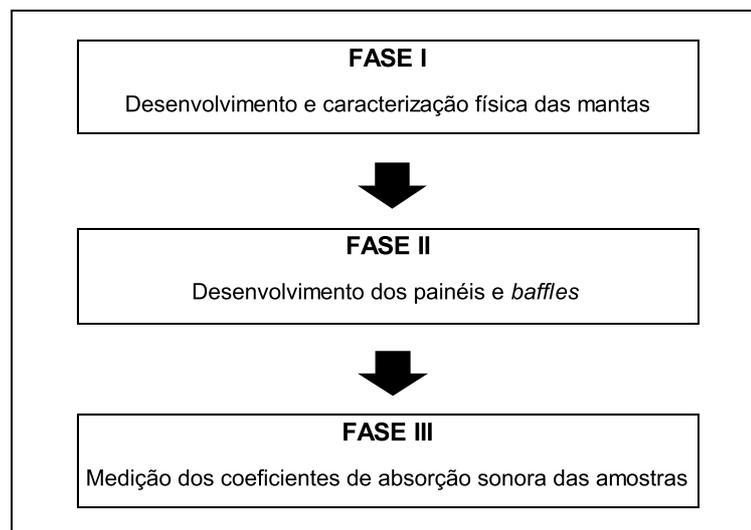
3 MÉTODO

De forma a desenvolver e atingir os objetivos propostos deste trabalho foi desenvolvido um programa experimental, descrito nos itens no Capítulo 3, constando as etapas, avaliações e métodos para obtenção dos resultados.

3.1 DEFINIÇÃO DAS ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O trabalho teve seu desenvolvimento dividido em fases de estudo, cada qual com sua devida importância e divisão de frentes de trabalho, sendo dividido conforme o esquema presente na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma das fases do programa experimental



Fonte: Elaborado pelo Autor

Neste caso, a fase I foi constituída pela fabricação das mantas de lã de PET, a partir das matérias primas e processos executivos descritos na sequência, resultando em seis composições distintas, possuindo duas espessuras com três densidades cada. Após, estas foram caracterizadas fisicamente no laboratório itt Performance – Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Na fase II foram executados os sistemas de painel e *baffle* pelo corte das amostras fabricadas na etapa anterior para que fossem cumpridas as medidas apropriadas aos ensaios de determinação da absorção sonora.

Por fim, na fase III, os ensaios na câmara reverberante do laboratório de Acústica do itt Performance, para determinação dos coeficientes de absorção sonora

das diferentes composições de manta de lã de PET e métodos de montagem, foram efetuados tanto para as amostras de painel como para as de *baffle*. Esta fase foi responsável pela determinação do desempenho das amostras desenvolvidas e proporciona subsídios para avaliação da influência das características físicas das mantas e do seu posicionamento.

3.1.1 Fase I: Desenvolvimento e caracterização física das mantas

As mantas foram desenvolvidas em parceria com a empresa Planalto Têxtil, localizada na cidade de Encantado/RS, de modo a investigar diferentes composições de densidade, para uma mesma espessura de fibra, em espessuras de produto usualmente praticadas no mercado. Tais dimensões e densidades foram baseadas nas comumente adotadas por fabricantes nacionais e internacionais, em seus produtos aplicados como painéis e *baffles*, resultando nas amostras descritas pela Tabela 5, as quais foram fabricadas em placas, com dimensões de 100x100 cm (KNAUF-AMF, 2019; PLANALTO, 2019; SAINT-GOBAIN, 2019abcde; TRISOFT, 2019; ALTENBURG, 2020; ARMSTRONG, 2020; KINETICS, 2020).

Tabela 5 – Composições de manta de lã de PET

Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)
60	20, 25 e 30
65	30, 35 e 40

Fonte: Elaborado pelo autor

A matéria prima utilizada para fabricação das mantas seguiu uma proporção de 70% de fibra de PET reciclada e 30% de fibra bicomponente. As mantas foram executadas pelo método de *drylaying*, conforme registro via Fotografia 1 a Fotografia 3, fazendo uso de uma linha de produção mecânica com uma carda e um dobrador de véu, e consolidação térmica, por meio de um forno com fluxo de ar quente. A linha de produção teve operação com velocidade adequada para a fabricação das diversas composições de espessura e densidade propostas, sendo estas cortadas, após resfriamento, nas dimensões de 100x100 cm e envolvidas por sacos plásticos identificados, garantindo segurança, praticidade e rastreabilidade em seu transporte.

Fotografia 1 – Fibras de PET recicladas (a) antes e (b) após abertura das fibras



(a)



(b)

Fonte: Registrado pelo Autor

Fotografia 2 – (a) Misturador/tremonha de alimentação e cardagem e (b) dobrador de véu



(a)



(b)

Fonte: Registrado pelo Autor

Fotografia 3 – (a) Consolidação térmica e (b) produto final



(a)



(b)

Fonte: Registrado pelo Autor

Durante a produção das mantas, sua densidade e espessura foram controladas ao longo do processo, de modo a garantir que fossem atingidas as composições esperadas, com a menor variabilidade possível, utilizando balança, modelo Digital 50 kg do fabricante Micheletti, e paquímetro, modelo Digital Absolute 200mm do fabricante Mitutoyo, devidamente calibrados frente ao Inmetro/RBC. Após sua fabricação as mantas foram transportadas até o laboratório de Acústica do itt Performance.

No laboratório, para medição final de suas características físicas, as amostras foram cortadas, nas dimensões adequadas, seguindo as recomendações da ABNT NBR 13908 (ABNT, 1997). Estas foram então mantidas, até os ensaios, por 48 horas em ambiente com atmosfera-padrão condicionada, de modo a cumprir com os requisitos da norma ABNT NBR ISO 139 (ABNT, 2008), a temperatura de $23,0 \pm 2,0$ °C e umidade relativa do ar de $50,0 \pm 4,0\%$, controlada por meio de sistema de condicionamento de ar, e verificada por meio de equipamento multímetro, modelo

LogBox-RHT-LCD, do fabricante Novus, devidamente calibrado frente ao Inmetro/RBC.

Neste caso, pela falta de disponibilidade de equipamento específico, a espessura das mantas foi obtida a partir de uma adaptação das recomendações da norma ISO 5084 (ISO, 1996). Para tal, foram ensaiadas 10 seções de cada uma das composições de manta, com dimensões de 25x25 cm, totalizando uma área 625 cm², às quais foram submetidas, individualmente, a aplicação de 0,88 kPa de pressão, por uma chapa de aço carbono MSG de 25x25x1,27 cm. As amostras foram dispostas sobre mesa de granito plana e nivelada, efetuando as medições no centro geométrico da face superior da placa de aço, quando transcorridos 30 segundos da aplicação de pressão, por meio de um paquímetro, modelo Digital Absolute 200mm do fabricante Mitutoyo, devidamente calibrado frente ao Inmetro/RBC. A partir dos valores medidos foi descontada a espessura da chapa de aço, verificada por meio do mesmo paquímetro, e foi efetuada uma média aritmética entre as 10 amostras de cada uma das composições de manta.

Ainda, a massa por unidade de área foi verificada por meio das recomendações presentes na norma ABNT NBR 12984 (ABNT, 2009), efetuando a pesagem individual de 10 seções de cada uma das composições de manta com dimensões de 25x25 cm, totalizando 625 cm² (verificada por meio de paquímetro) Para tal, foi utilizada balança, modelo AD10K do fabricante Marte, régua de aço, modelo 300mm do fabricante Zaas Precision, e paquímetro, modelo Digital Absolute 200mm do fabricante Mitutoyo, devidamente calibrados frente ao Inmetro/RBC. Os resultados foram obtidos por meio da Equação 1 e foi realizada uma média aritmética entre os valores medidos em cada uma das composições de manta.

$$G = \frac{M}{A} * 10 \quad \text{Equação 1}$$

Sendo,

G: Massa por unidade de área, em kg/m²;

M: Massa do corpo de prova, em g;

A: Área do corpo de prova, em cm².

Ainda, a densidade aparente das amostras foi obtida a partir dos resultados obtidos da caracterização das propriedades físicas conforme as recomendações das

normas ISO 5084 (ISO, 1996) e ABNT NBR 12984 (ABNT, 2009) seguindo a Equação 2.

$$\rho = \frac{G}{E} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo,

ρ : Densidade aparente, em kg/m³;

G: Massa por unidade de área, em kg/m²;

E: Espessura do corpo de prova, em m.

Por fim, a porosidade das composições de manta foi determinada a partir da Equação 3, referenciada por Mao, Russell e Pourdeyhimi (2007), a partir dos resultados médios obtidos nos ensaios supracitados e da média ponderada da densidade das fibras, visto que foram utilizadas dois tipos com propriedades distintas.

$$\varepsilon = \left(1 - \left(\frac{\rho_m}{\rho_f} \right) \right) * 100 \quad \text{Equação 3}$$

Sendo,

ε : Porosidade, em %;

ρ_m : Densidade aparente média da amostra, em g/cm³;

ρ_f : Densidade média das fibras, em g/cm³.

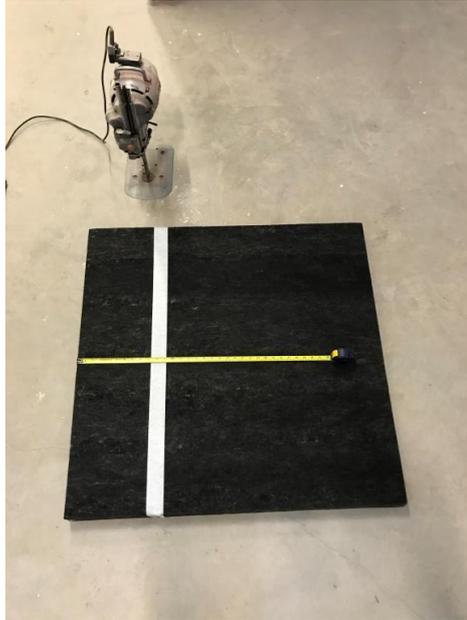
3.1.2 Fase II: Desenvolvimento dos painéis e *baffles*

A partir da confecção das mantas de lã de PET, em placas com dimensões de 100x100 cm, estas foram cortadas nas dimensões adequadas aos tipos de montagem na configuração de painéis e *baffles*. Para os painéis foram utilizadas 9 seções de 100x100 cm e 3 seções de 100x75 cm. Já nos *baffles* as placas de manta foram cortadas pela metade, possuindo 100x50 cm, estando próximos às dimensões praticadas e recomendadas por Szimanski (2008), Knauf-AMF (2019) e Saint-Gobain (2019b).

O corte das mantas foi realizado por meio da utilização de uma máquina de corte reto de tecido com lâmina vertical, modelo 960C, o fabricante Singer, de operação manual. As dimensões do corte foram realizadas com trena, devidamente

calibrada frente ao Inmetro/RBC, e marcadas por fita crepe para auxiliar o corte. A Fotografia 4 ilustra as ferramentas e o processo de preparo dos cortes.

Fotografia 4 – Recorte de manta de lã de PET com máquina Singer 960C



Fonte: Registrado pelo Autor

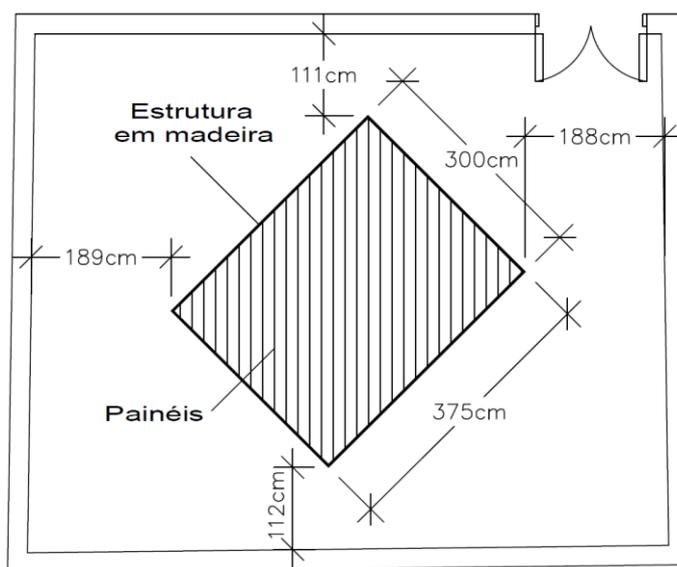
Desta forma as amostras foram trabalhadas para cumprirem com as requisições das normas e, ao mesmo tempo, utilizar o menor número e quantidade de material possível, viabilizando sua avaliação pelo ponto de vista econômico e ambiental.

3.1.3 Fase III: Medição dos coeficientes de absorção sonora das amostras

Para obtenção dos coeficientes de absorção sonora das amostras, seja na configuração de painéis ou *baffles*, medições do tempo de reverberação, sem e com a presença das amostras, foram efetuadas na câmara reverberante do Laboratório de Acústica do itt Performance. A câmara e os métodos de ensaio cumprem com as prescrições da norma ISO 354 (ISO, 2003), sendo que esta possui volume de 200,3 m³, área superficial total de 218,0 m² e conta com 20 difusores em acrílico, os quais totalizam uma área de 22,6 m². A condição das amostras para ensaio dos dois tipos de sistemas empregados foi distinta, aplicando os tipos de montagem recomendados pela norma de ensaio, de modo a simular um cenário de real aplicação, além da avaliação de uma composição de material por vez.

Para a avaliação dos painéis, em todas as composições de espessura e densidade, foi adotado o tipo de montagem A e E, descritos na norma de ensaio, avaliando seu desempenho sem (A) e com a presença de uma camada de ar (E), de 5 e 10 cm, adotando a respectiva nomenclatura E50 e E100, em sua porção posterior à exposta ao campo sonoro. Para tal, nos três casos, foi adotada uma área superficial de 11,25 m², com uma razão geométrica (largura versus comprimento) de 0,8 e planos da amostra não paralelos às paredes da câmara, conforme Figura 10. Ainda, as laterais dos painéis foram totalmente seladas pelo uso de uma estrutura de madeira, plana, com espessura de 10 mm, variando sua altura em função da espessura das mantas, assim como da camada de ar no tipo de montagem E, para que a altura da estrutura e das superfícies das mantas coincidisse.

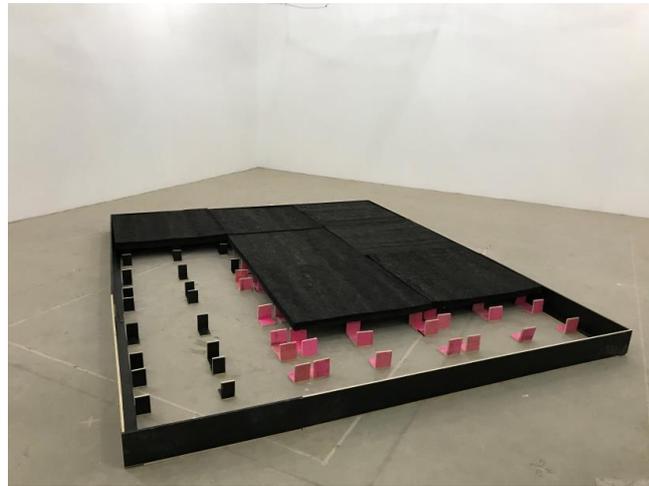
Figura 10 – Disposição dos painéis nos tipos de montagem A, E50 e E100 na câmara reverberante



Fonte: Elaborado pelo Autor

A estrutura em madeira compensada com superfície plastificada, plana, de 1,0 cm de espessura, no tipo de montagem E, foi responsável por selar as laterais dos painéis e a camada de ar do campo sonoro da câmara reverberante. Ainda, a camada de ar foi promovida pelo recorte do mesmo material para construção de peças em formato de cantoneira com largura de 7 cm e altura de 5 e 10 cm, em função do tipo de montagem, para que as mantas fossem elevadas do piso da câmara de ensaio, conforme a Fotografia 5.

Fotografia 5 – Estrutura de madeira para selagem lateral e cantoneiras para obtenção de camada de ar em painéis de 60 mm no tipo de montagem E100



Fonte: Registrado pelo Autor

A nomenclatura definida para os painéis é composta por uma abreviação do tipo de sistema (PNL), seguida pela espessura da amostra, sua densidade e o tipo de montagem adotado, ao exemplo de: PNL-60mm-25kg/m³-E50. Ainda, as Fotografia 6 e Fotografia 7 ilustram uma amostra, em condição de ensaio, com dois tipos de montagem distintos, contando com a presença de fita crepe, com 48 mm de largura, para selagem das juntas entre as amostras.

Fotografia 6 – Amostra de 60 mm instalada dentro da câmara reverberante no tipo e montagem: (a) A e (b) E50



(a)

(b)

Fonte: Registrado pelo Autor

Fotografia 7 – Amostra de 60 mm instalada no tipo de montagem E100



Fonte: Registrado pelo Autor

Já os *baffles*, para todas as configurações de espessura e densidade, utilizaram o tipo de montagem J, seguindo as recomendações da norma de ensaio. Foram instalados na vertical, tocando o piso da câmara, utilizando seções de lã de PET de 100x50 cm, 75x50 e 50x50 cm, justapostas, para a formação de fileiras. Sendo adotados diferentes espaçamentos entre as fileiras, de 25, 50, 75 e 100 cm, adotando, respectivamente, a nomenclatura 250, J500, J750 e J1000, de modo a variar a configuração dos sistemas. Ainda, foi utilizada uma estrutura de madeira compensada com superfície plastificada, plana, de 1,0 cm de espessura e 50 cm de altura, em duas das laterais dos arranjos, e arame para a estruturação das seções de *baffle*, complementando os sistemas para execução dos ensaios, conforme Fotografia 8.

Fotografia 8 – Amostra de 60 mm instalada dentro da câmara reverberante no tipo e montagem: (a) J250, (b) J500, (c) J750 e (d) J1000



(a)

(b)



(c)

(d)

Fonte: Registrado pelo Autor

Ainda, a norma de ensaio preconiza que tais sistemas sejam ensaiados em 2 ou 3 fileiras e com uma quantidade de material suficiente para cobrir uma área de 10 a 15 m² do piso da câmara de ensaio. Tal condição somente não pôde ser cumprida no tipo de montagem J250, dada a proximidade entre as amostras, necessitando de maior quantidade de fileiras para que a área mínima fosse atingida. A quantidade de fileiras e dimensões dos *baffles*, área total das amostras e área de piso ocupada pelos arranjos, em cada uma das composições de amostra e tipos de montagem está presente na Tabela 6.

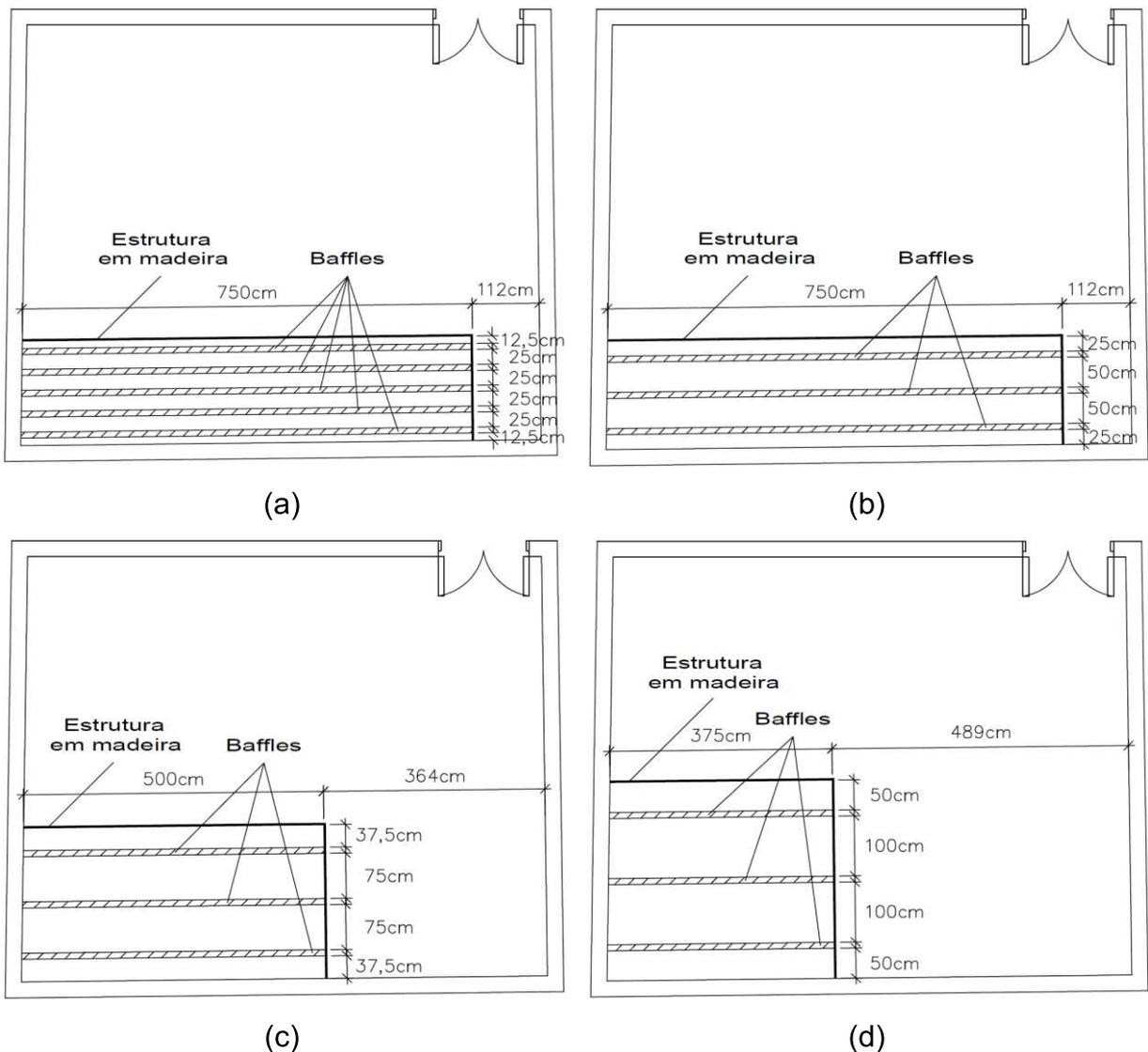
Tabela 6 – Características dos arranjos de *baffles*

Tipo de montagem	Espessura da amostra (mm)	Fileiras		<i>Baffles</i>		Área da projeção no piso (m ²)
		Espaçamento (cm)	Quantidade	Quantidade	Área (m ²)	
J250	60	25	5	35 un. 100x50	18,75	11,25
	65			cm;		5 un. 50x50 cm
J500	60	50	3	21 un. 100x50	11,25	12,38
	65			cm;		3 un. 50x50 cm
J750	60	75	3	15 un. 100x50	7,50	12,00
	65			cm		
J1000	60	100	3	9 un. 100x50 cm;	5,62	11,81
	65			3 un. 75x50 cm		12,09

Fonte: Elaborado pelo autor

Neste caso, para os *baffles*, a nomenclatura adotada é composta por uma abreviação do tipo de sistema (BFL), seguida pela espessura da amostra, sua densidade, e o tipo de montagem adotado, ao exemplo de: BFL-60mm-25kg/m³-J250. Ainda, a disposição dos arranjos, para cada um dos tipos de montagem, está ilustrada por meio da Figura 11, nos quais foi adotado um dos cantos da câmara reverberante, sendo escolhido o mais distante da porta, que foi utilizado como ponto de reflexivo/barreira para o confinamento das amostras em sua estrutura de contorno.

Figura 11 – Disposição dos arranjos de *baffles* nos tipos de montagem: (a) J250, (b) J500, (c) J750 e (d) J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

As medições foram realizadas com um analisador sonoro Classe 1, modelo 2270, dotado de microfone de 1/2", modelo 4189, com pré-amplificador, modelo ZC0032, do fabricante Brüel&Kjaer, devidamente calibrado frente ao Inmetro/RBC. Tal analisador sonoro conta com software de aquisição e tratamento de dados para cálculo do tempo de reverberação da câmara, em sua situação vazia e com a amostra, embutido. Três posições de emissão sonora foram adotadas, utilizando uma caixa dodecaédrica, modelo 4292-L, com amplificador de potência modelo 2734-A também do fabricante Brüel&Kjaer, posicionada diretamente no chão da câmara.

Em conjunto, foram utilizadas quatro posições de recepção, a 1,2 m do chão da câmara, totalizando doze pontos de medição, obtendo o tempo de reverberação por meio do método interrompido, com uso de ruído rosa, com três decaimentos por posição, efetuando as medições em bandas de um terço de oitava e com frequências centrais de 100 a 5000 Hz. Ainda, as condições ambientais foram medidas com equipamento multímetro, modelo LogBox-RHT-LCD, do fabricante Novus, devidamente calibrado frente ao Inmetro/RBC.

Medidos os tempos de reverberação da câmara vazia (com a presença da estrutura de fechamento dos arranjos na posição estipulada) e com cada uma das composições, os coeficientes de absorção sonora, para cada banda de frequência, de cada sistema de painel e *baffle*, foram calculados por meio da Equação 4.

$$\alpha_s = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad \text{Equação 4}$$

Sendo,

α_s : Coeficiente de absorção sonora, por banda de frequência;

V: Volume da câmara reverberante, em m³;

S: Para painéis: área superficial da amostra, em m²; Para *baffles*: somatório da área de cada uma das três faces expostas das unidades, em m²;

c_1 : Velocidade de propagação do som no ar na condição da câmara vazia, em m/s;

c_2 : Velocidade de propagação do som no ar na condição da câmara com a amostra, em m/s;

T_1 : Média aritmética dos tempos de reverberação medidos nas diferentes posições na condição da câmara vazia (painéis: totalmente vazia; *baffles*: contendo estrutura de madeira), por banda de frequência, em s;

T_2 : Média aritmética dos tempos de reverberação medidos nas diferentes posições na condição da câmara com a amostra, por banda de frequência, em s;

m_1 : Coeficiente de atenuação de potência do som na condição da câmara vazia, por banda de frequência, em dB/m;

m_2 : Coeficiente de atenuação de potência do som na condição da câmara com a amostra, por banda de frequência, em dB/m.

De posse dos coeficientes de absorção sonora das amostras, por bandas de um terço de oitava, foi calculado o coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w).

Este foi obtido por meio da metodologia de cálculo presente na ISO 11654 (ISO, 1997), a qual compara os coeficientes de absorção sonora, por banda de oitava, da amostra com uma curva padrão, em que o coeficiente de absorção sonora ponderado corresponde a posição da curva padrão, na banda de frequência de 500 Hz, quando a soma dos valores desfavoráveis é menor ou igual a 0,1.

Por fim, algumas das análises dos coeficientes de absorção sonora ponderados das amostras foram efetuadas com auxílio do coeficiente de correlação r de Pearson, pois promove a quantificação da associação linear entre as duas variáveis envolvidas. Neste caso, quanto maior for seu resultado (em módulo) maior é a correlação entre as variáveis envolvidas, conforme os intervalos expressos no Quadro 1 (MASON; GUNST; HESS, 2003; RATNER, 2009; LARSON; FARBER, 2015).

Quadro 1 – Intervalos de classificação dos coeficientes de correlação r de Pearson

Resultado	Interpretação
$r = 0$	Não há relação linear
$0 < r < 0,3$	Relação fraca
$0,3 < r < 0,7$	Relação moderada
$0,7 < r < 1,0$	Relação forte
$r = 1$	Perfeita relação linear

Fonte: Adaptado pelo autor de Ratner (2009)

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Fibras de poliéster

As fibras de poliéster utilizadas no desenvolvimento das mantas de lã de PET, fabricadas pelos processos de *drylaying* e consolidação térmica, foram fornecidas pela empresa Ecofabril Indústria e Comércio, com sede na cidade de Jundiaí/SP. Foi utilizada uma proporção de 70% de fibra de PET (Fotografia 9), fabricada com matéria prima reciclada, redonda, com densidade de $1,39 \text{ g/cm}^3$, densidade linear de 7 dtex (0,0007 g/m) e 64 mm de comprimento, de cor branca ou preta. Combinada com 30% de fibra bicomponente, com interior em PET e revestimento em CoPET,

redonda, com densidade de $1,35 \text{ g/cm}^3$, densidade linear de 4 dtex, 51 mm de comprimento, de cor branca ou preta, com temperatura de fusão inferior a $110 \text{ }^\circ\text{C}$, em oposição aos $265 \text{ }^\circ\text{C}$ da fibra de PET. A proporção e escolha das fibras foram feitas seguindo as recomendações de Pourmohammadi (2007) e Küçük e Korkmaz (2015).

Fotografia 9 – Fibra de PET reciclada na cor branca



Fonte: Registrado pelo Autor

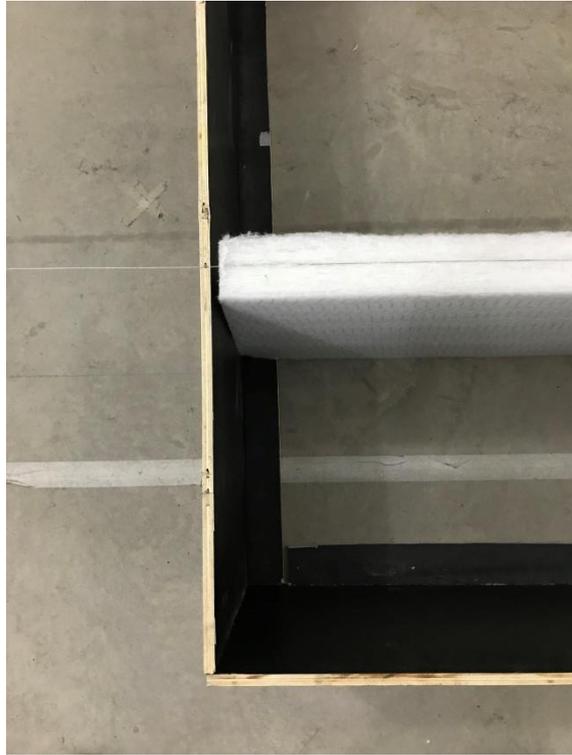
3.2.2 Estrutura de madeira

Para a realização da caracterização dos materiais frente à sua capacidade de absorção sonora foi necessária a utilização de uma estrutura de madeira, com a finalidade de selagem lateral dos arranjos de painéis e *baffles*, sendo esta de compensado, plano, de 10 mm com suas superfícies plastificadas. As chapas de compensado foram cortadas nas dimensões adequadas e pregadas por meio de pregos, de aço, com cabeça simples e tamanho 12x12.

Ainda, na caracterização dos *baffles* foi utilizado arame galvanizado 18, no sentido do comprimento das amostras (Fotografia 10), para proporcionar

estabilidade horizontal na parte superior das seções de manta de lã de PET, sendo a ligação feita por meio de grampos confeccionados pelo mesmo arame.

Fotografia 10 – Estrutura de compensado plastificado com arame galvanizado e *baffle* de 60 mm



Fonte: Registrado pelo Autor

4 RESULTADOS

Neste capítulo estão presentes os resultados obtidos no programa experimental proposto, assim como a validação destes a partir dos conceitos apresentados no referencial bibliográfico, além de análises comparativas entre as composições e tipos de instalação das amostras.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os resultados médios, obtidos pela metodologia supracitada, das medições da espessura, massa por unidade de área, densidade aparente e porosidade das amostras de 60 e 65 mm estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados médios de espessura, massa por unidade de área, densidade aparente e porosidade das amostras de lã de PET

Amostra	Espessura média (mm)	Massa por unidade de área média (kg/m²)	Densidade aparente média (kg/m³)	Porosidade média (%)
60 mm e 20 kg/m ³	59,95	1,30	21,69	98,00
60 mm e 25 kg/m ³	60,74	1,52	25,02	98,00
60 mm e 30 kg/m ³	60,98	1,74	28,50	98,00
65 mm e 30 kg/m ³	64,75	1,93	29,78	98,00
65 mm e 35 kg/m ³	64,49	2,23	34,62	97,00
65 mm e 40 kg/m ³	64,27	2,51	39,08	97,00

Fonte: Elaborado pelo autor

A verificação da espessura média das amostras mostrou variações, em relação à espessura definida para fabricação, sendo a máxima de 0,98 mm na composição de 60 mm e 30 kg/m³.

Quando da utilização da massa por unidade de área, esta se mostra interessante como parâmetro comparativo com sistemas comumente disponíveis no mercado, além de proporcionar, em conjunto com as medições de espessura, a obtenção da densidade aparente das amostras. Neste caso, a maior diferença de densidade aparente média foi de 1,69 kg/m³ acima da definição de fabricação na composição de 60 mm e 20 kg/m³.

Já a porosidade de todas as amostras foi elevada, com 97 a 98%, faixa de acordo com o esperado pelas definições de Mao, Russell e Pourdeyhimi (2007), que

citam que não-tecidos de espessuras elevadas possuem porosidades que usualmente ultrapassam 80% e podem chegar a 98%. Ainda, pela pequena variação de porosidade entre as amostras, este não foi um parâmetro que pôde ser utilizado para a avaliação e comparação da capacidade de absorção sonora das diferentes composições de manta de lã de PET.

Tais variações, verificadas por meio das medições em laboratório, em relação às características propostas, são esperadas em diferentes pontos de não-tecidos, conforme esperado por Mao, Russell e Pourdeyhimi (2007), e são causadas pelos processos, maquinários e controle de qualidade envolvidos na produção do material.

Ainda, um resumo detalhado dos resultados, condições ambientais e data dos ensaios, de cada uma das composições ensaiadas, está localizado no APÊNDICE A.

4.2 COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA

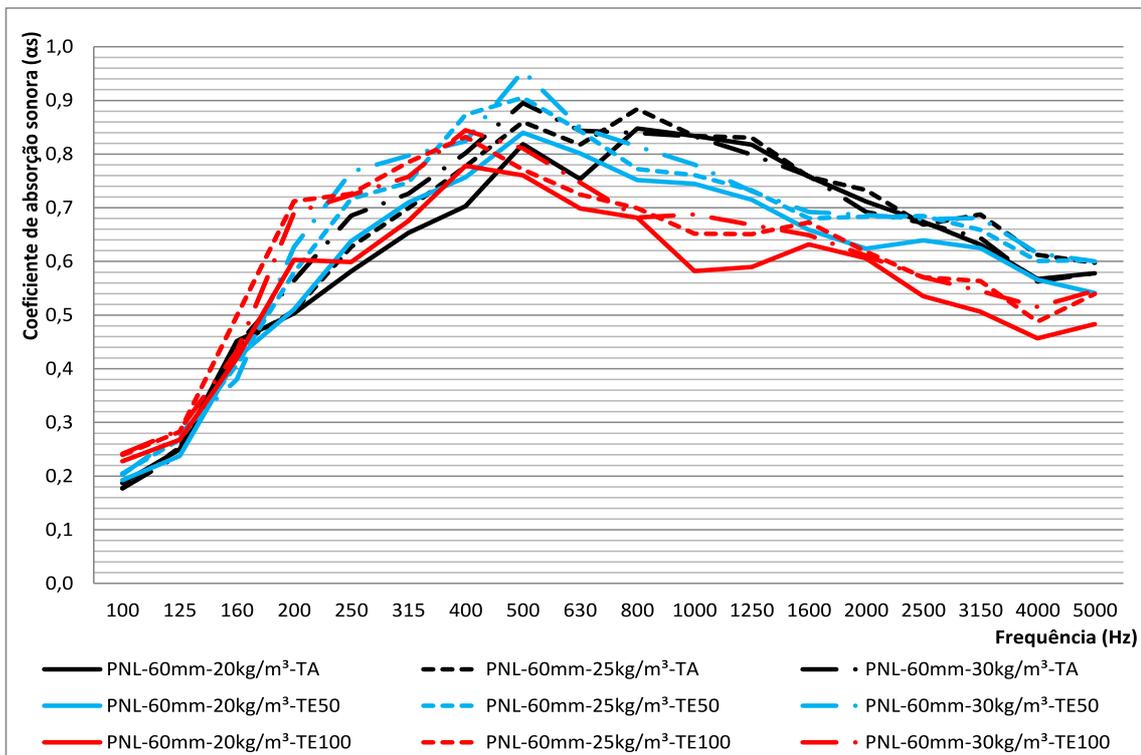
A partir da caracterização física das amostras, que permite a verificação das características dos sistemas ensaiados, bem como a reprodutibilidade do estudo aqui presente, a apresentação dos resultados de absorção sonora, e suas análises, é possibilitada a partir de sua obtenção seguindo as metodologias supracitadas.

Ainda, um resumo detalhado dos resultados, condições ambientais e data dos ensaios, de cada uma das composições ensaiadas, está localizado no APÊNDICE B.

4.2.1 Painéis

Para os painéis, seus coeficientes de absorção sonora, por banda de um terço de oitava (100 a 5.000 Hz), estão expressos por meio do Gráfico 1 ao Gráfico 7 (amostras de 60 mm de espessura) e do Gráfico 8 ao Gráfico 14 (amostras de 65 mm de espessura), para os três tipos de montagem e densidades definidas, e são sucedidos pela sua análise. Neste caso, a primeira análise, promovida pelo Gráfico 1, realiza um comparativo geral das amostras de 60 mm de espessura frente às três diferentes densidades e tipos de montagem, conforme segue.

Gráfico 1 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm nos tipos de montagem A, E50 e E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir do Gráfico 1 é possível verificar que, em todas as amostras com espessura de 60 mm, para todos os tipos de montagem e densidades, os coeficientes de absorção sonora dos sistemas obtiveram um espectro com baixa capacidade de absorção nas bandas de baixa frequência, elevada absorção nas bandas de média frequência com um pequeno decréscimo para as bandas de alta frequência, corroborando com o verificado pela bibliografia. Para esta configuração de espessura e densidades, a manta de lã de PET possui coeficientes de absorção sonora que se assemelham e tornam o produto competitivo quando comparado à lã de vidro, com espessura e densidade similar, sendo uma alternativa ao mercado (DEL REY et al., 2011; KLIPPEL FILHO et al., 2017; SAINT-GOBAIN, 2019cd).

Ainda, é possível verificar a influência da densidade dos sistemas em sua capacidade de absorção sonora, nos quais maiores densidades resultaram em maiores coeficientes de absorção sonora na maioria das bandas de frequência analisadas, corroborando com a bibliografia (KOIZUMI; TSUJIUCHI; ADACHI, 2002; SEDDEQ, 2009; EVEREST; POHLMANN, 2015).

Da mesma forma, o tipo de montagem também influenciou na capacidade de absorção sonora das mantas, sendo que a inclusão, e aumento, da camada de ar entre as seções de manta e a superfície reflexiva resultaram em um pequeno ganho nos coeficientes de absorção sonora nas bandas de baixa frequência, conforme o esperado por Kang (2002), Newell (2012), Kleiner e Tichy (2014), Cox e D'Antonio (2017) e redução na capacidade de absorção nas bandas de alta frequência. Neste último caso, os resultados não se comportaram conforme o esperado pelas referências bibliográficas supracitadas, visto que ganhos nos coeficientes de absorção sonora eram esperados em bandas de frequência pontuais quando da utilização de uma camada de ar de um quarto do comprimento de onda, sendo a banda de 1.600 Hz para o tipo de instalação E50 e 800 Hz para a montagem E100, os quais não foram obtidos nas amostras deste estudo.

Sendo assim, devido a grande quantidade de dados presente no Gráfico 1, os resultados foram individualizados de forma a proporcionar a avaliação da influência da densidade das amostras para um mesmo tipo de instalação e, gráficos para visualização do impacto do tipo de montagem em amostras de mesma densidade.

Gráfico 2 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm no tipo de montagem A

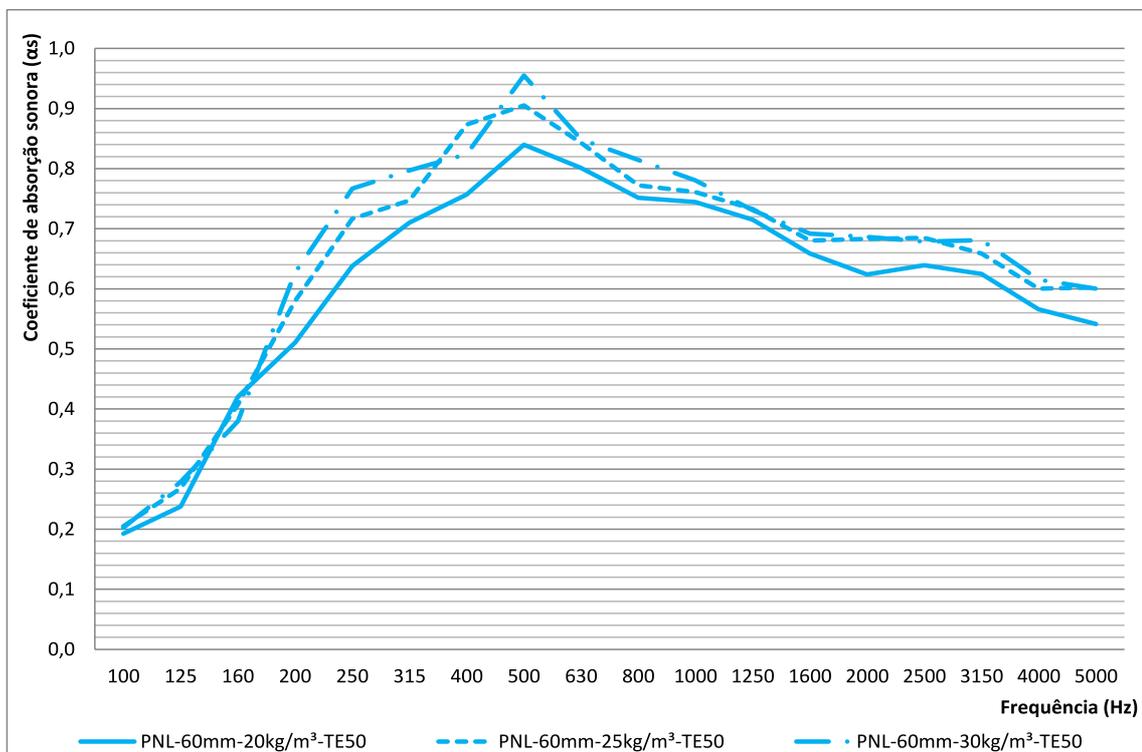


Fonte: Elaborado pelo Autor

O Gráfico 2 promove a análise individual de amostras de 60 mm de espessura, no tipo de montagem A, nas três densidades propostas no estudo, em que de 100 a 160 Hz as amostras possuem mesmo comportamento, com acréscimo do coeficiente de absorção sonora com o aumento da frequência. De 160 a 500 Hz todas as amostras possuem ganho de absorção sonora, sendo que quanto maior a densidade da manta maior foi a capacidade de absorção, sendo sucedido por um decréscimo, em todas as amostras, na banda de 630 Hz, mantendo o mesmo comportamento de densidade versus capacidade de absorção.

Em sequência, de 630 Hz a 5.000 Hz, todas as amostras obtiveram coeficientes de absorção sonora com comportamento similar e decrescente com o aumento da frequência, sendo que, nesta faixa de bandas de frequência a manta de 25 kg/m³ obteve os maiores coeficientes de absorção sonora, seguida pela amostra de 20 kg/m³ e, por fim, a de 30 kg/m³.

Gráfico 3 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm no tipo de montagem E50



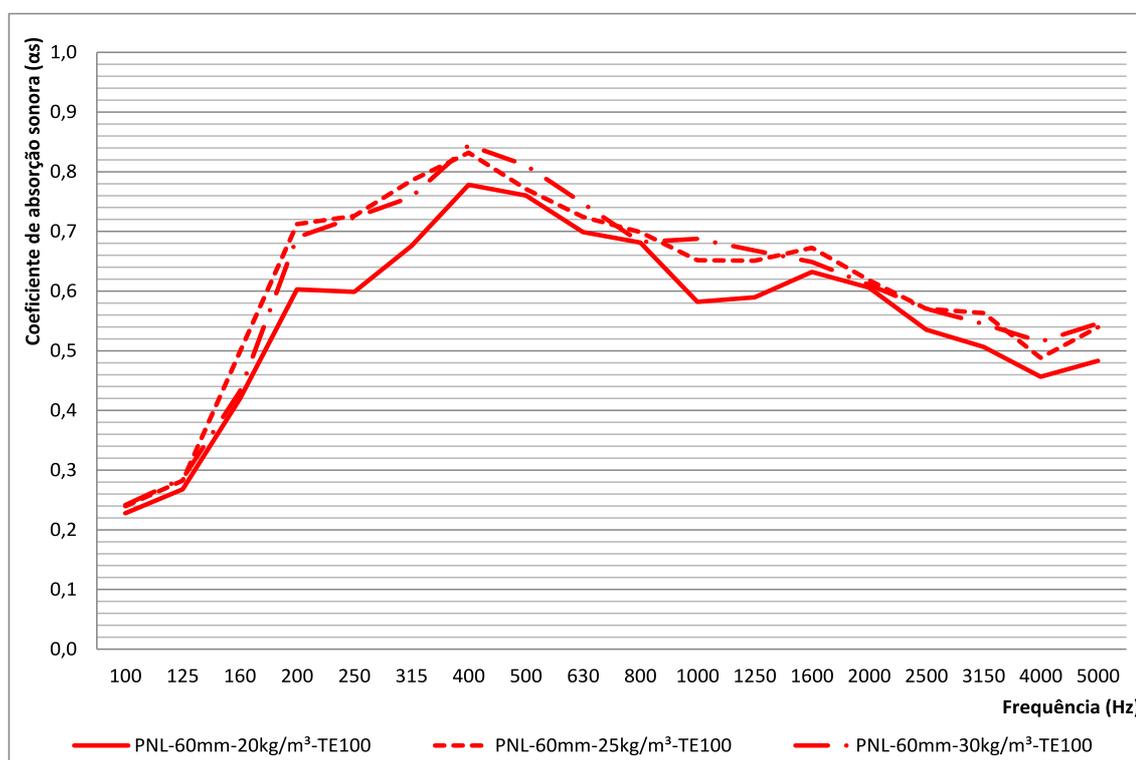
Fonte: Elaborado pelo Autor

Considerando as amostras de 60 mm de espessura no tipo de montagem E50, a partir do Gráfico 3, de 100 a 160 Hz, os coeficientes de absorção sonora obtiveram ligeira variação e aumentaram com o crescimento das bandas de

frequência. A partir de 160 Hz as amostras obtiveram aumento nos seus resultados até o pico em 500 Hz. Nesta faixa, a diferença na capacidade de absorção sonora entre as diferentes densidades foi mais expressiva, em que, novamente, quanto maior a densidade das mantas maiores foram os coeficientes de absorção sonora (exceto na banda de frequência de 400 Hz, ponto no qual a amostra de 25 kg/m³ obteve maior capacidade de absorção que a manta de 30 kg/m³).

Por fim, de 500 a 5.000 Hz, os coeficientes de absorção sonora diminuíram com o aumento das bandas de frequência, sendo mantido o comportamento verificado na faixa analisada anteriormente, para todas as bandas de frequência, com maior capacidade de absorção quanto maior a densidade. Porém, neste caso, em contrapartida a faixa de 160 a 500 Hz, a taxa de perda da capacidade de absorção sonora foi mais acentuada quanto maior a densidade das mantas.

Gráfico 4 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm no tipo de montagem E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

No tipo de montagem E100 (Gráfico 4), para as amostras de 60 mm de espessura, de 100 a 125 Hz os resultados foram crescentes com o aumento das frequências. Na faixa de 125 a 400 Hz a absorção sonora aumentou com o crescimento da frequência, havendo um decréscimo na taxa de aumento de 200 a

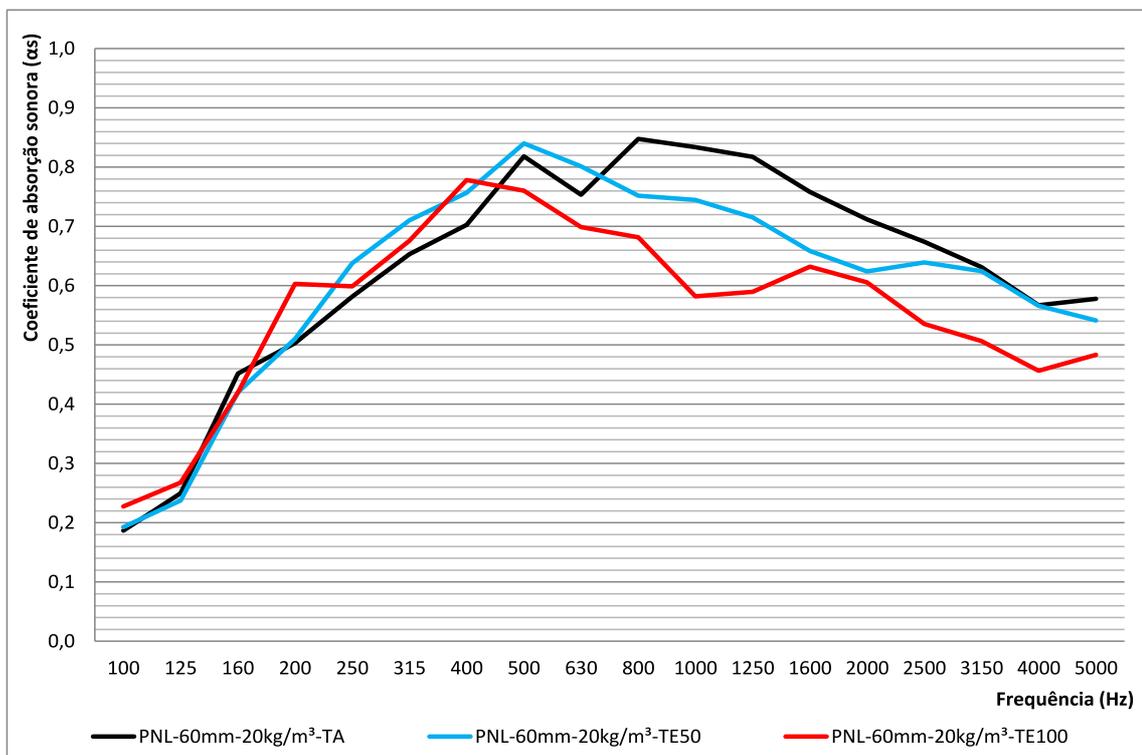
250 Hz, sendo retomado até 400 Hz. Neste caso, a amostra com densidade de 25 kg/m³ obteve a maior capacidade de absorção, em toda faixa de frequências (exceto em 400 Hz), seguida pela amostra de 30 kg/m³ e 20 kg/m³.

De 400 a 4.000 Hz as amostras tiveram seus coeficientes de absorção sonora reduzidos com o aumento das frequências (exceto para a amostra de 20 kg/m³ que teve um crescimento de 1.000 a 1.600 Hz). Nesta faixa de frequências a amostra de 20 kg/m³ obteve os menores coeficientes de absorção sonora, sendo que os maiores resultados foram verificados pela manta de 30 kg/m³ de 400 a 630 Hz, em 1.000 e 4.000 Hz, e pela amostra de 25 kg/m³ nas demais bandas de frequência.

Por fim, de 4.000 a 5.000 Hz, os coeficientes de absorção sonora aumentaram, sendo mais elevados na amostra de 30 kg/m³, sucedida pela manta de 25 kg/m³ e pela de 20 kg/m³.

Após a avaliação da influência da densidade nas amostras de 60 mm de espessura, nos mesmos tipos de montagem, é realizada a avaliação do impacto da instalação em amostras de mesma densidade e espessura, sendo os resultados de amostras de 60 mm de espessura e densidade de 20 kg/m³ ilustrados pelo Gráfico 5.

Gráfico 5 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm e 20 kg/m³ nos tipos de montagem A, E50 e E100

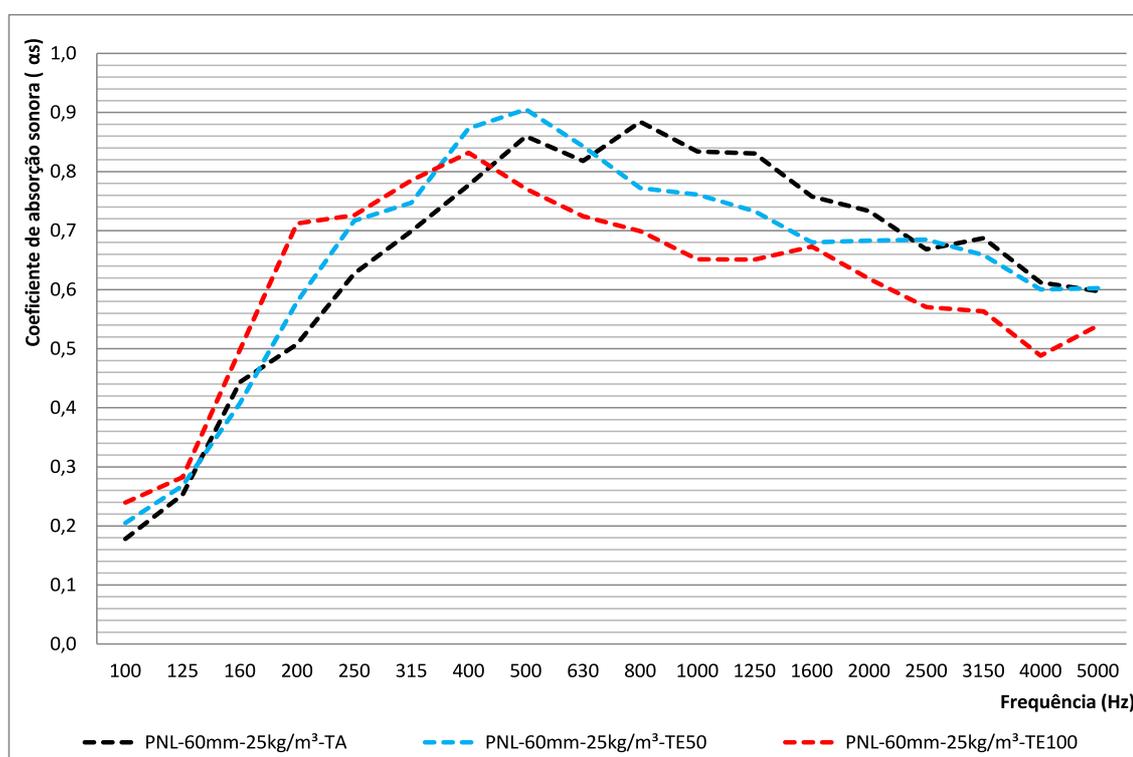


Fonte: Elaborado pelo Autor

Considerando tais amostras (Gráfico 5), de 100 a 125 Hz os coeficientes de absorção sonora aumentaram, para todos os tipos de montagem, sendo a amostra com 100 mm de camada de ar a que obteve maior capacidade de absorção. Este intervalo foi seguido por ganhos expressivos de absorção sonora até 500 Hz (exceto no tipo de montagem E100 que ocorreu até 400 Hz). Nesta faixa as amostras obtiveram resultados com comportamento similar de 125 a 160 Hz, sendo a amostra de maior capacidade de absorção alternada nas demais frequências, na qual a amostra sem camada de ar (tipo de montagem A) obteve os menores resultados.

Nas demais bandas de frequência, até 5.000 Hz, a amostra sem camada de ar obteve os maiores resultados, apenas com uma pequena perda de capacidade de absorção em 630 Hz, sendo sucedida pela amostra com 50 mm e pela de 100 mm de camada de ar, evidenciando perda na capacidade de absorção sonora nas médias e altas frequências quanto maior a espessura da camada de ar aplicada.

Gráfico 6 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm e 25 kg/m³ nos tipos de montagem A, E50 e E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

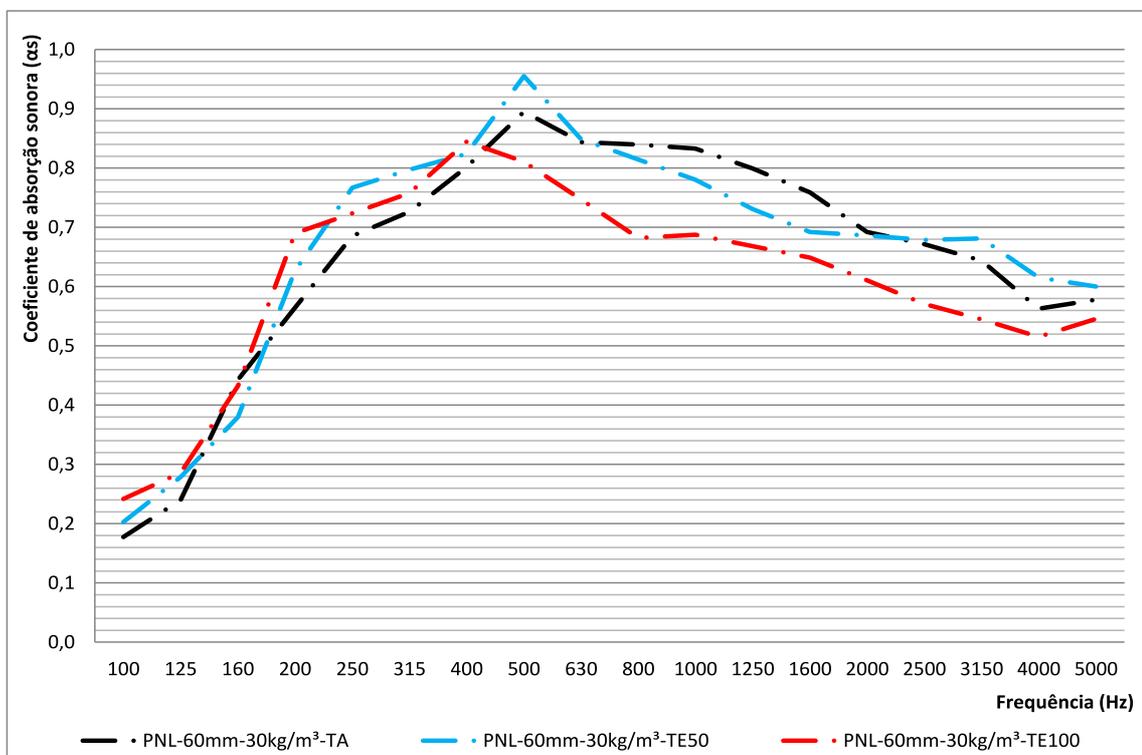
Por meio do Gráfico 6 a análise das amostras de painéis com densidade de 25 kg/m³ e 60 mm de espessura se faz possível, no qual, em baixas frequências (especificamente de 100 a 315 Hz), a amostra com maior camada de ar (100 mm),

obteve os maiores coeficientes de absorção sonora. Esta foi seguida pela instalação com 50 mm de camada de ar, salvo na banda de 160 Hz, e, finalmente, pela montagem dos painéis diretamente na superfície reflexiva.

As amostras obtiveram crescente capacidade de absorção sonora de 100 Hz até 400 Hz, para o tipo de montagem E100, e até 500 Hz, para as montagens A e E50, sendo o maior coeficiente de absorção sonora (0,91) obtido pela instalação com 50 mm de camada de ar. Ainda, os painéis posicionados diretamente na superfície reflexiva obtiveram absorção sonora máxima em 800 Hz após leve queda em sua capacidade de absorção na banda de frequência imediatamente inferior.

Após os picos nos coeficientes de absorção sonora, para os três tipos de montagem, os coeficientes de absorção sonora dos painéis de 25 kg/m³ sofreram decaimento nas altas frequências, em que a amostra sem a presença de camada de ar obteve a maior capacidade de absorção sonora em todas as bandas de frequência (exceto nas bandas de 2.500 e 5.000 Hz), seguida pela instalação com camada de ar de 50 mm e, por fim, pela montagem com 100 mm de camada de ar.

Gráfico 7 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 60 mm e 30 kg/m³ nos tipos de montagem A, E50 e E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

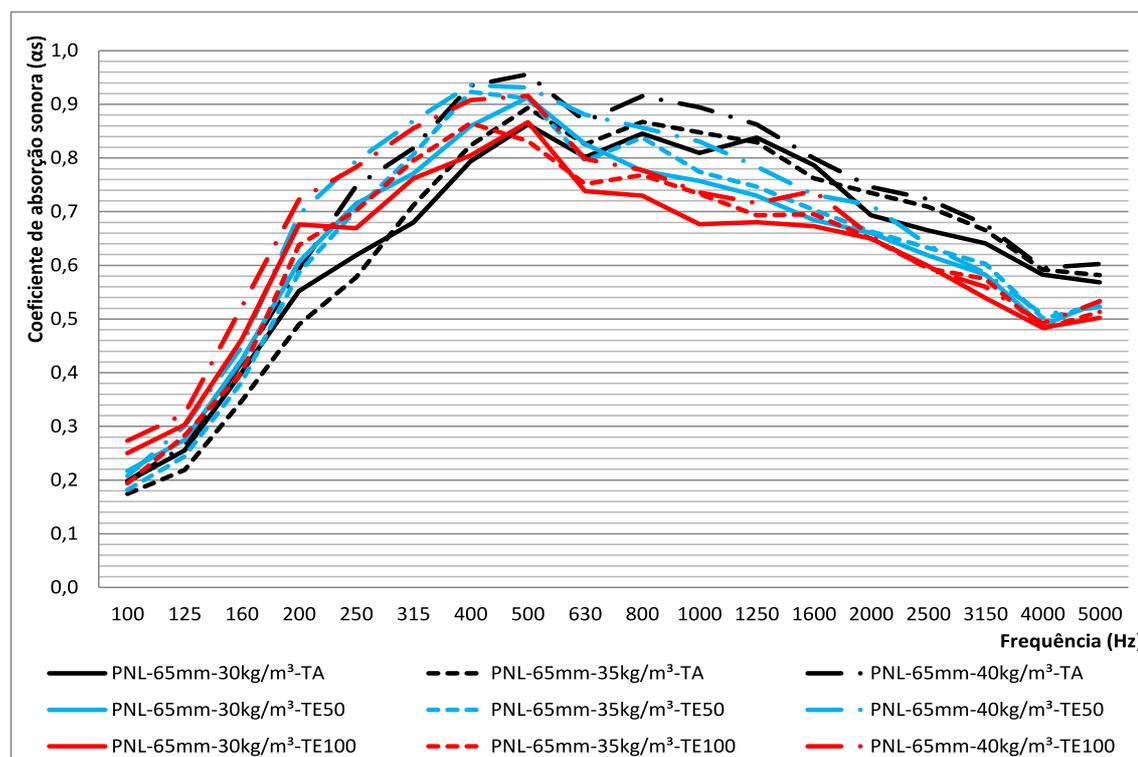
Considerando as amostras com densidade de 30 kg/m^3 e 60 mm de espessura, também nos três tipos de instalação propostos, a amostra com camada de ar de 100 mm obteve os maiores coeficientes de absorção sonora de 100 a 200 Hz (exceto na banda de 160 Hz).

Os coeficientes de absorção sonora aumentaram de 200 Hz até seu pico em 400 Hz , para os painéis com camada de ar de 100 mm , e 500 Hz , para as amostras demais. Neste caso, os painéis com camada de ar de 50 mm obtiveram os maiores resultados, seguidos pela amostra sem e com 100 mm de camada de ar.

Na sequência das bandas de frequência nas quais ocorreram os resultados máximos houve decréscimo na capacidade de absorção sonora até a banda de 4.000 Hz e ganho até 5.000 Hz . Nesta faixa de frequências a amostra sem a presença de camada de ar obteve os maiores coeficientes de absorção sonora de na maioria das bandas de frequência, seguida pela instalada no modo E50 e E100.

Após a análise dos painéis com 60 mm de espessura, o Gráfico 8 ilustra os coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm , para as três composições de densidade propostas, instaladas nas três formas de montagem definidas.

Gráfico 8 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm nos tipos de montagem A, E50 e E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

No caso dos resultados das amostras de 65 mm de espessura (Gráfico 8), quando comparadas às de 60 mm, possuem maiores coeficientes de absorção sonora, em praticamente todas as bandas de frequência, devido à sua maior espessura e maior densidade. Ainda, o pico da capacidade de absorção sonora dos painéis ocorre em torno de 500 Hz, banda mais próxima à relação de máxima eficiência do material com espessura igual a um décimo do comprimento de onda, novamente conforme o esperado pelas referências bibliográficas (BARRON, 2003; LECHNER, 2012; NEWELL, 2012; ERMANN, 2015; EVEREST; POHLMANN, 2015; QIU, 2016; COX; D'ANTONIO, 2017; DUNNE; DESAI; SADIKU, 2017).

As amostras de 65 mm de espessura mostraram o mesmo comportamento em sua capacidade de absorção sonora frente às bandas de frequência analisadas, com baixos coeficientes nas baixas frequências, aumentando até altos resultados nas médias frequências e decrescendo para valores médios nas bandas de alta frequência, conforme verificado anteriormente para materiais fibrosos. Neste caso, o presente material possui capacidade de absorção sonora equivalente com produtos como a lã de vidro, em espessura e densidade similares, se mostrando uma alternativa competitiva (DEL REY et al., 2011; KLIPPEL FILHO et al., 2017; SAINT-GOBAIN, 2019cd).

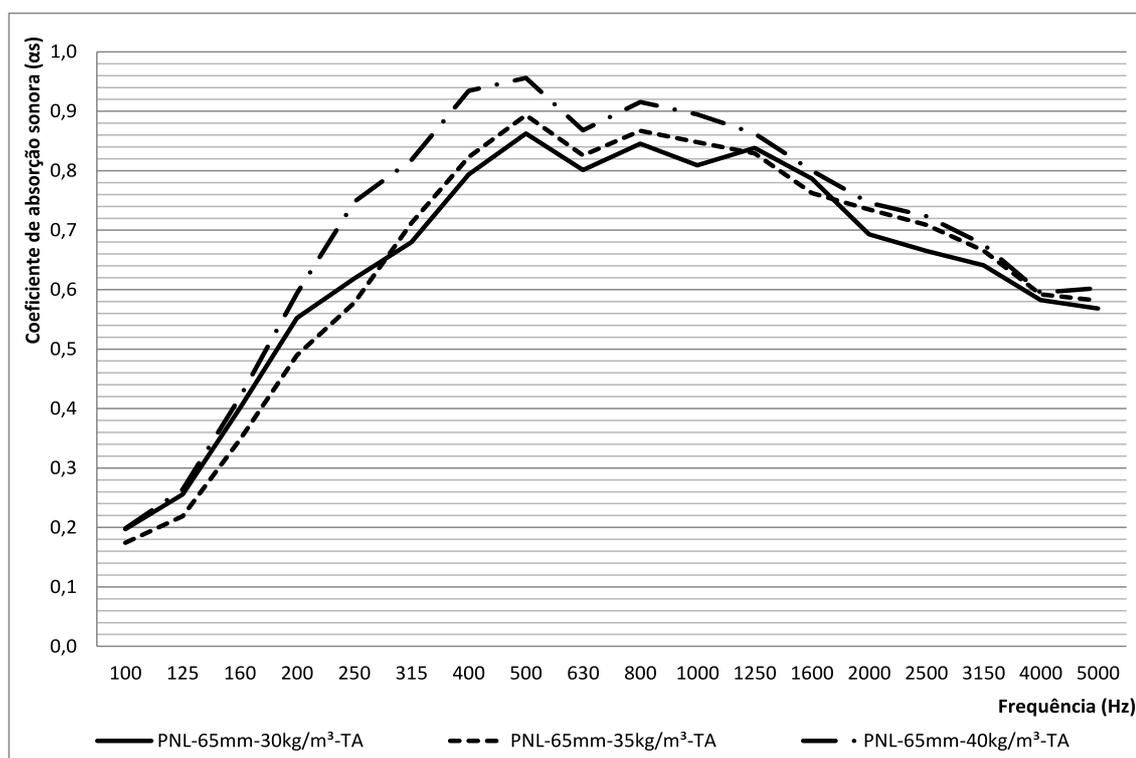
Novamente, o aumento da densidade das amostras resultou em acréscimo dos coeficientes de absorção sonora, na maioria das configurações e bandas de frequência, conforme previsto pela bibliografia (KOIZUMI; TSUJIUCHI; ADACHI, 2002; SEDDEQ, 2009; EVEREST; POHLMANN, 2015).

Igualmente às amostras anteriores, o modo de instalação modificou os coeficientes de absorção sonora, sendo que a inserção de maiores camadas de ar entre as mantas e a superfície reflexiva resultou em aumento na capacidade de absorção nas bandas de baixa frequência, conforme esperado por Kang (2002), Newell (2012), Kleiner e Tichy (2014), Cox e D'Antonio (2017) e possuíram redução na capacidade de absorção nas bandas de alta frequência. Mais uma vez, os resultados não ocorreram conforme previsão das referências bibliográficas, visto que não houve aumento na absorção sonora esperado pela utilização de uma camada de ar de um quarto do comprimento de onda, sendo a banda de 1.600 Hz para o tipo de instalação E50 e 800 Hz para a montagem E100.

Assim como para as amostras com espessura de 60 mm, para os painéis de 65 mm os resultados também foram fracionados, seguindo as mesmas análises,

para promover um comparativo facilitado da influência da densidade das mantas em um mesmo tipo de instalação e a modificação causada pelo modo de montagem em amostras de mesma densidade e espessura nos coeficientes de absorção sonora.

Gráfico 9 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm no tipo de montagem A



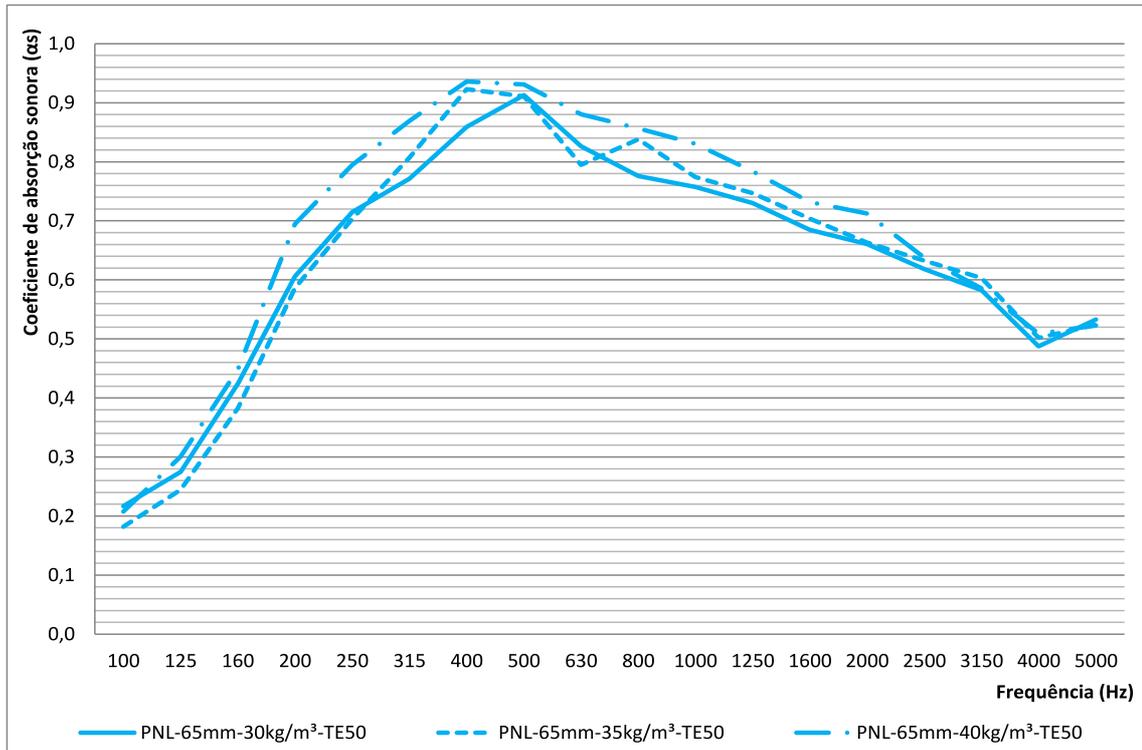
Fonte: Elaborado pelo Autor

Primeiramente, analisando os painéis de 65 mm, nas três densidades propostas e instaladas diretamente na superfície reflexiva, a partir do Gráfico 9, as três configurações possuem coeficientes de absorção sonora reduzidos na banda de 100 Hz, aumentando até seu pico, com valores elevados, na banda de 500 Hz. Nesta faixa, a amostra de maior densidade (40 kg/m^3) obteve os resultados mais elevados, em todas as bandas de frequência, seguida pelos painéis de 30 kg/m^3 de 100 a 250 Hz, e pela amostra de 35 kg/m^3 .

Após o pico na capacidade de absorção sonora, em 500 Hz, os resultados decaíram em 630 Hz e voltaram a aumentar na banda de 800 Hz, ponto no qual os coeficientes de absorção sonora caem até as altas frequências (exceto para a amostra de 30 kg/m^3 que obteve oscilações na sua capacidade de absorção sonora de 500 a 1.250 Hz). Em todas estas bandas de frequência a amostra de maior

densidade obteve os resultados mais elevados, seguida pela amostra de 35 kg/m³ (com exceção às bandas de 1.250 e 1.600 Hz), e pelos painéis de menor densidade.

Gráfico 10 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm no tipo de montagem E50

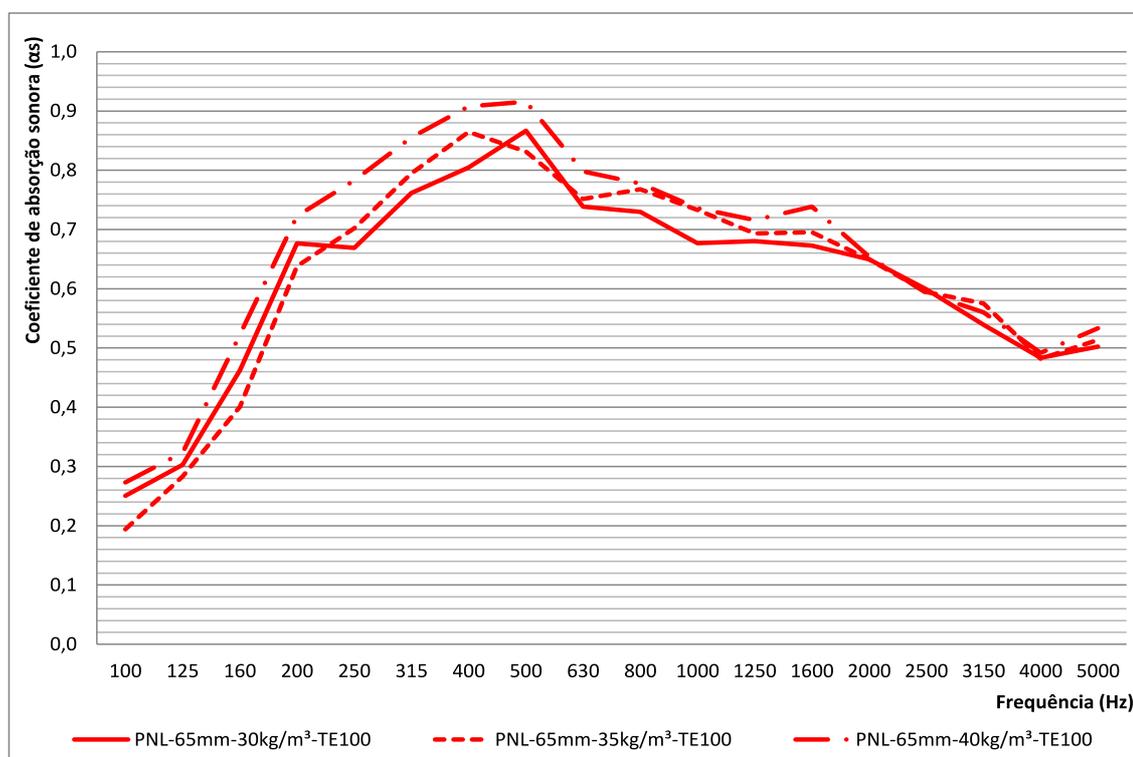


Fonte: Elaborado pelo Autor

Com a adição da camada de ar de 50 mm (Gráfico 10), em relação à análise anterior, o comportamento dos coeficientes de absorção sonora frente à densidade das amostras é similar. Nesta configuração, a amostra de maior densidade obteve a maior capacidade de absorção sonora de 125 Hz até seu pico, em 400 Hz, sendo reduzida então até a banda de 4.000 Hz. A segunda maior capacidade de absorção foi verificada pelos painéis de 30 kg/m³, de 100 a 250 Hz, sendo seguida pelas amostras de 35 kg/m³.

O coeficiente de absorção sonora máximo da amostra de 35 kg/m³ ocorreu em 400 Hz, sendo o segundo maior, e sofreu redução nas bandas de frequência subsequentes até 4.000 Hz (salvo uma recuperação pontual em 800 Hz). Já os painéis de menor densidade tiveram sua capacidade de absorção sonora máxima na banda de 500 Hz e sofreram redução até 4.000 Hz. E, de 4.000 a 5.000 Hz todas as três amostras sofreram leve aumento nos seus coeficientes de absorção sonora.

Gráfico 11 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm no tipo de montagem E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

Considerando os painéis de 65 mm com uma camada de ar de 100 mm, sendo o tipo de montagem E100, os coeficientes de absorção sonora estão expressos por meio do Gráfico 11.

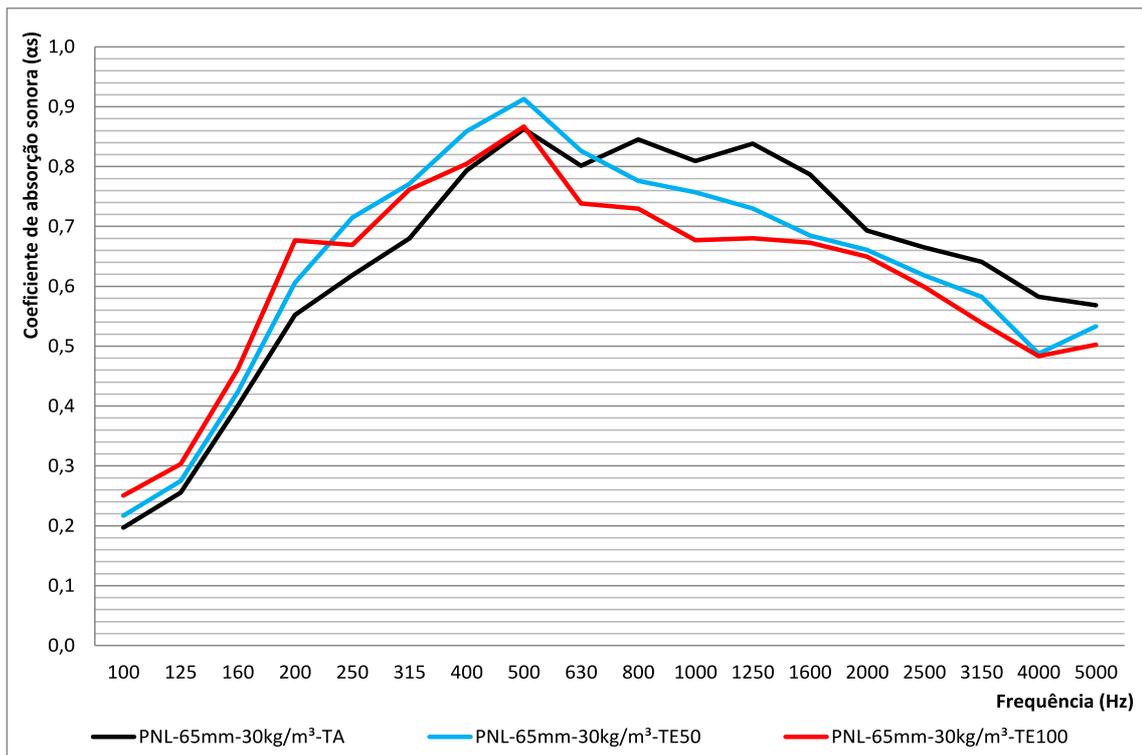
Neste caso, a amostra de maior densidade atingiu a maior capacidade de absorção sonora em todas as bandas de frequência analisadas, com coeficientes modestos nas baixas frequências, aumentando até resultados elevados no seu pico máximo em 500 Hz, reduzindo até 4.000 Hz (com ganho na banda de 1.600 Hz), e obtendo um leve aumento até a banda de 5.000 Hz.

Em sequência, de 100 a 200 Hz, os painéis de 30 kg/m³ obtiveram a segunda maior capacidade de absorção sonora, sendo ultrapassada pela amostra de 35 kg/m³, com pico em 400 Hz, nas demais frequências (exceto no pico dos coeficientes de absorção sonora dos painéis de 30 kg/m³ na banda de 500 Hz).

Ainda, após os resultados máximos das amostras de 30 kg/m³ e 35 kg/m³, em 500 e 400 Hz, respectivamente, a capacidade de absorção foi diminuindo até 4.000 Hz, salvo alguns ganhos pontuais, e sofreram leve aumento em 5.000 Hz.

Novamente, analisando a influência do modo de instalação, mas desta vez com as amostras de 65 mm de espessura, com a densidade de 30 kg/m^3 , por meio do Gráfico 12.

Gráfico 12 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm e 30 kg/m^3 nos tipos de montagem A, E50 e E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

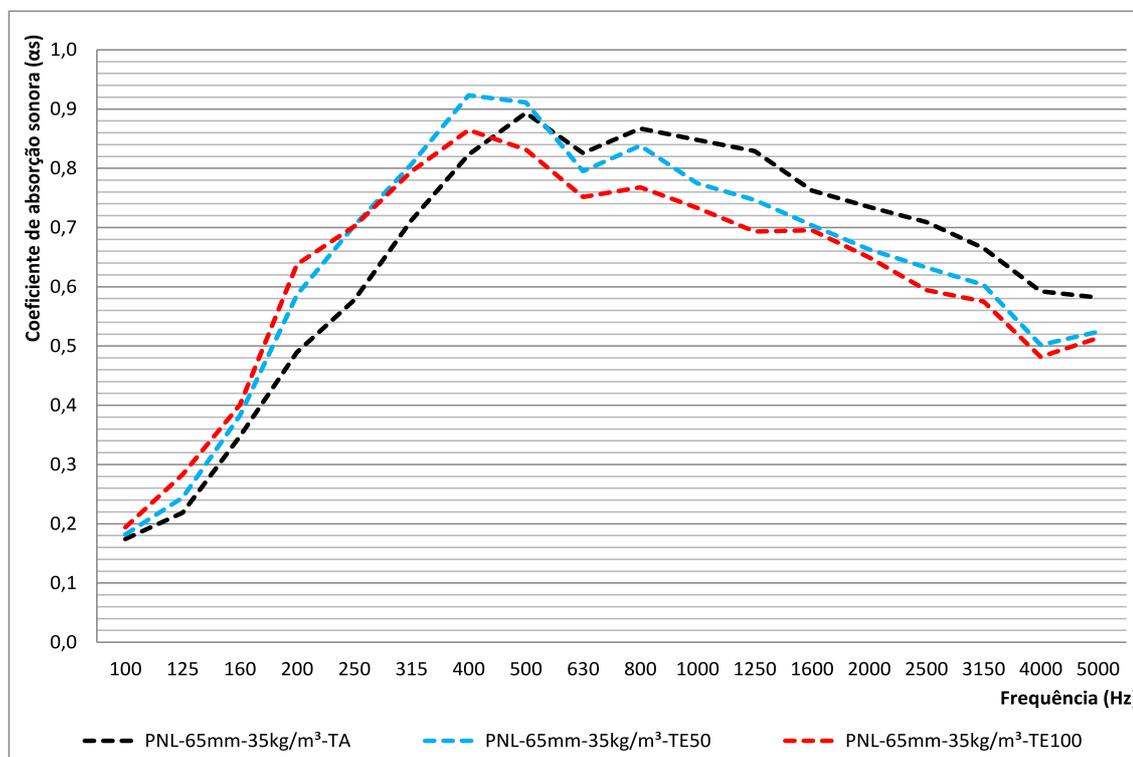
Para esta configuração de espessura e densidade (Gráfico 12), de 100 a 200 Hz a amostra com maior camada de ar obteve os maiores coeficientes de absorção sonora, seguida pela instalada com camada de ar de 50 mm e pela disposta diretamente na superfície reflexiva.

A partir da banda de 250 Hz a mostra instalada no tipo E50 obteve a maior capacidade de absorção, passando por seu máximo em 500 Hz, até a banda de 630 Hz, sendo seguida pelos painéis com 100 mm de camada de ar. Já os painéis com ausência de camada de ar obtiveram coeficientes de absorção sonora crescentes até seu valor máximo, em 500 Hz, sofrendo oscilações até 1.600 Hz e redução até a banda de 5.000 Hz.

As amostras instaladas com camada de ar tiveram seus coeficientes de absorção sonora reduzidos a partir de seus valores máximos (500 Hz) até a banda de 4.000 Hz e sofreram leve aumento até 5.000 Hz. Nesta faixa os painéis sem

camada de ar obtiveram a maior capacidade de absorção sonora, seguidos pelas amostras com 50 mm e pelas com 100 mm de camada de ar.

Gráfico 13 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm e 35 kg/m³ nos tipos de montagem A, E50 e E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

Considerando as amostras com densidade de 35 kg/m³, seus coeficientes de absorção sonora, presentes no Gráfico 13, possuem comportamento similar à configuração anterior, no qual os painéis com maior camada de ar possuem maior capacidade de absorção de 100 a 200 Hz, seguidos pelas amostras com 50 mm de camada de ar e pelas com ausência de camada de ar.

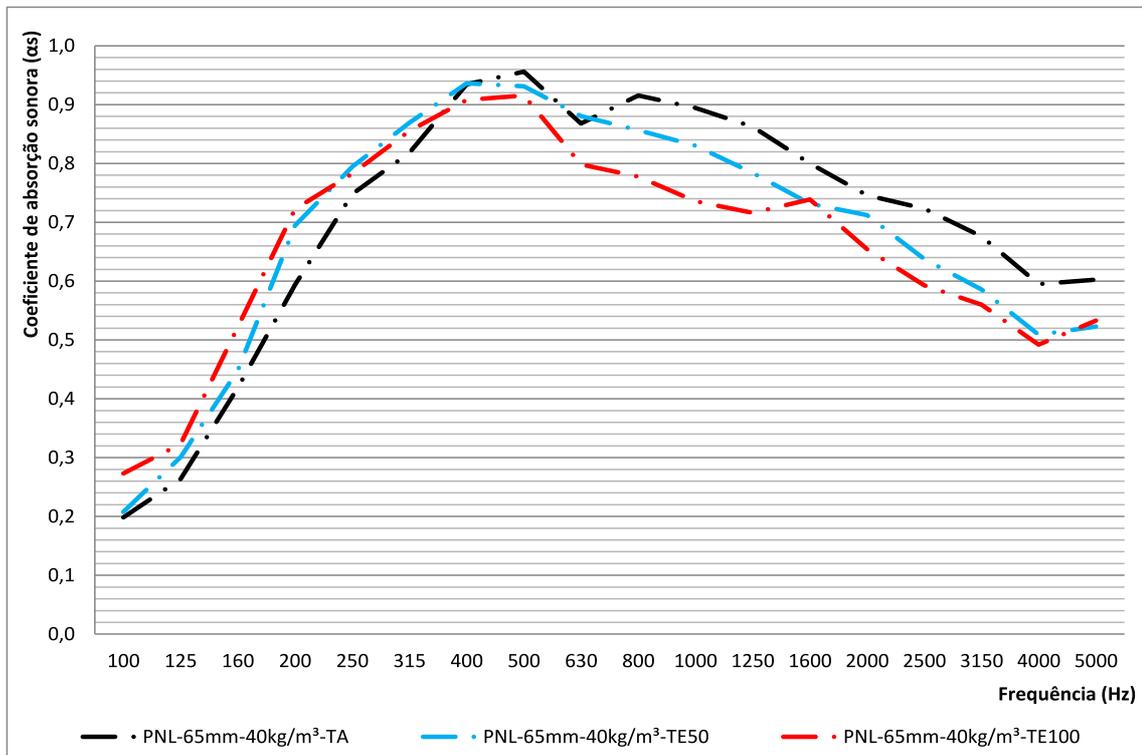
Da mesma maneira, a amostra instalada na montagem E50 obteve resultados superiores de 250 a 500 Hz, porém, com pico na capacidade de absorção na banda de 400 Hz. Os painéis com camada de ar de 100 mm possuem a segunda maior capacidade de absorção nas bandas de 315 Hz e, no seu pico, 400 Hz.

Após pico do coeficiente de absorção sonora, em 400 Hz, para as amostras nos tipos de montagem E50 e E100, seus coeficientes de absorção sonora diminuem até 4.000 Hz, com aumento pontual nas bandas de 800 e 5.000 Hz.

Por sua vez, a amostra sem camada de ar obtém o segundo maior coeficiente de absorção sonora, ocorrendo na banda de 500 Hz, e assume os maiores

resultados até a banda limite de 5.000 Hz, possuindo comportamento decrescente com o aumento das frequências (sendo mais acentuado pontualmente em 630 Hz).

Gráfico 14 – Coeficientes de absorção sonora dos painéis de 65 mm e 40 kg/m³ nos tipos de montagem A, E50 e E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

Por fim, analisando as amostras com 40 kg/m³ (Gráfico 14), o mesmo comportamento relatado nos últimos dois casos persiste de 100 a 200 Hz, com os maiores resultados ocorrendo da amostra com maior camada de ar para a amostra com ausência da mesma.

Neste caso, a amostra com camada de ar de 50 mm manteve seu coeficiente de absorção sonora máximo na banda de 400 Hz, novamente decaindo até a banda de 4.000 Hz, obtendo a segunda maior capacidade de absorção sonora em praticamente todas as bandas analisadas, e sofrendo leve aumento em 5.000 Hz.

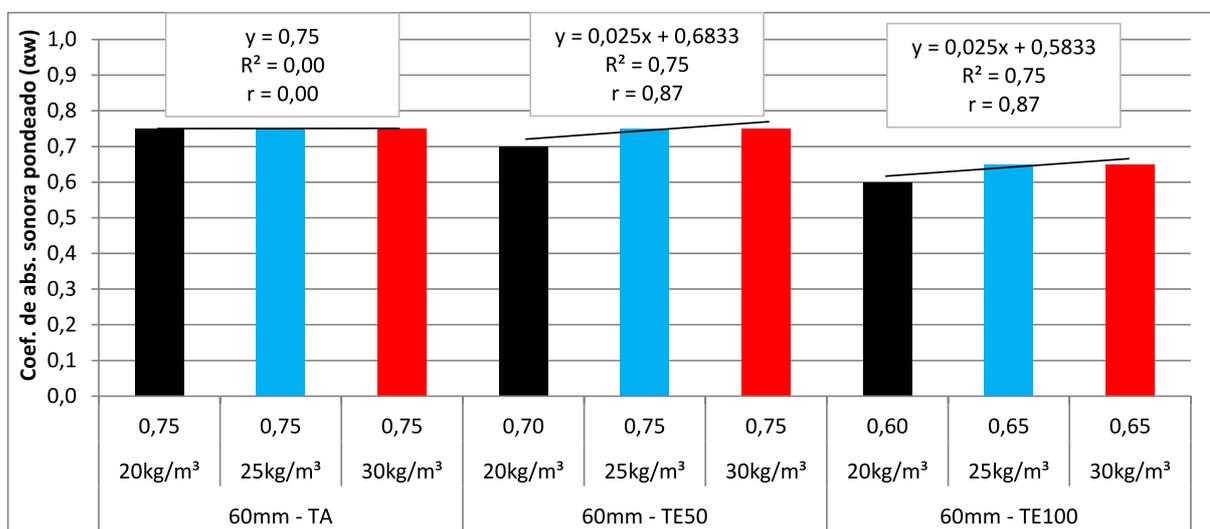
Já a amostra com camada de ar de 100 mm obteve o pico da sua capacidade de absorção sonora na banda de 500 Hz, reduzindo seus coeficientes, com exceção da banda de 1.600 Hz, até 4.000 Hz, e leve aumento em 5.000 Hz, com resultados elevados, mas inferiores às demais configurações.

E os maiores coeficientes de absorção sonora, após seu pico na banda de 500 Hz, até a banda limite de 5.000 Hz (exceto na banda de 630 Hz na qual ocorre

uma redução pontual elevada), foram obtidos pelos painéis instalados sem a presença de camada de ar entre os mesmos e a superfície reflexiva.

Após a análise dos coeficientes de absorção sonora em bandas de um terço de oitava dos painéis, nas combinações propostas, seus resultados ponderados são analisados. Estes estão presentes no Gráfico 15 e Gráfico 16, para os painéis com espessura de 60 mm e 65 mm, respectivamente, e proporcionam, de forma simplificada, a avaliação da influência da densidade das amostras e das formas de montagem na capacidade de absorção sonora.

Gráfico 15 – Coeficientes de absorção sonora ponderados dos painéis de 60 mm nos tipos de montagem A, E50 e E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os coeficientes de absorção sonora ponderados das amostras com 60 mm de espessura, presentes no Gráfico 15, mostram que os painéis, quando instalados sem a presença de camada de ar (tipo de montagem TA). Neste caso, estes têm elevada capacidade de absorção ($\alpha_w=0,75$) e a alteração da densidade dos painéis não influenciou no seu resultado, possibilitando a utilização de uma menor quantidade de material para um mesmo desempenho. Desta forma, o coeficiente de correlação r de Pearson, assim como um coeficiente de determinação, foi zero, pois não houve mudança no coeficiente de absorção sonora ponderado quando da alteração da densidade das amostras.

Para os mesmos painéis instalados com uma camada de ar de 50 mm (tipo de montagem E50) o coeficiente de absorção sonora ponderado da amostra de 20 kg/m³ foi 0,05 menor que no tipo de montagem A, porém, foi crescente desta

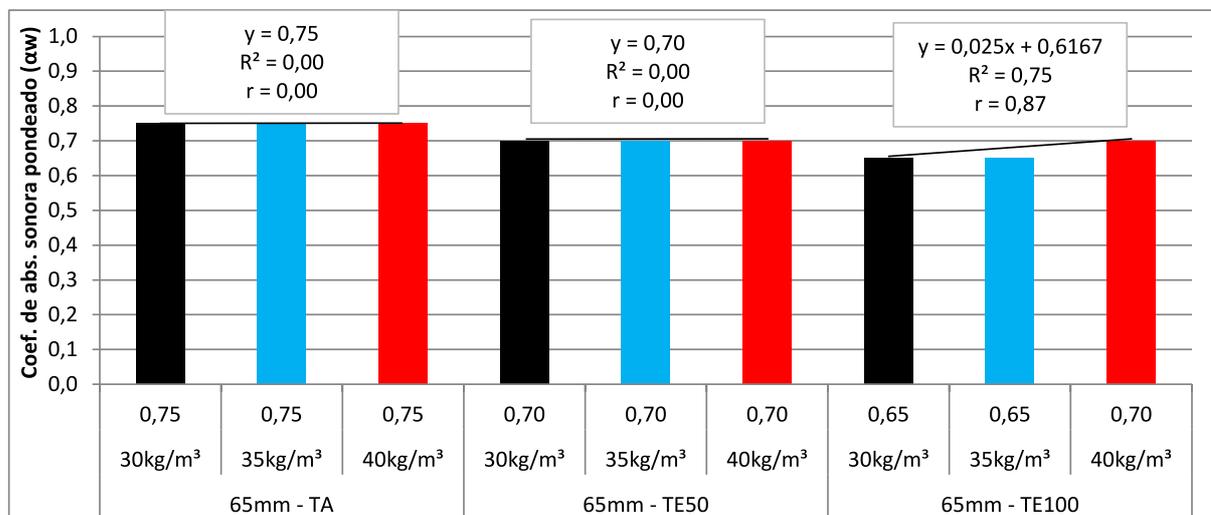
amostra para as mais densas (0,75). Desta forma, o coeficiente de correlação r de Pearson foi de +0,87, sendo considerada uma relação de linearidade forte, com tendência de aumento do coeficiente de absorção sonora ponderado com o aumento da densidade, mesmo que em taxa muito reduzida (0,025x), para o intervalo e quantidade de dados testados. Ainda, o coeficiente de determinação mostra que 75% das variações na relação entre o α_w e a densidade são explicadas pelos presentes dados.

Quando analisados os resultados das amostras instaladas com uma camada de ar de 100 mm o comportamento anterior se repetiu, porém, houve queda de 0,10 no coeficiente de absorção sonora ponderado nas três diferentes densidades, evidenciando perda da capacidade de absorção ponderada com o aumento da camada de ar. Da mesma forma, o coeficiente de correlação r de Pearson foi o mesmo, mostrando uma relação linear forte e crescente com o aumento da densidade mas com taxa reduzida (0,025x), e um coeficiente de determinação de 0,75, em que 75% das diferenças entre os dois parâmetros considerados são explicados por tais dados.

Em resumo, a presença da camada de ar entre as amostras e a superfície reflexiva manteve ou reduziu os coeficientes de absorção sonora ponderados. Sendo que a adição da camada de ar de 50 mm, nas amostras com densidade de 20 kg/m³, ocasionou redução de 0,05 no seu coeficiente de absorção sonora ponderado e as demais se mantiveram constantes. E quando do uso da camada de ar de 100 mm houve uma redução 0,15 no resultado ponderado da amostra com densidade de 20 kg/m³ e redução de 0,10 para as demais composições de manta.

E, considerando o impacto da densidade das mantas nos coeficientes de absorção sonora ponderados, para a instalação sem camada de ar, o desempenho do material não foi alterado quando do acréscimo de densidade da manta de lã de PET, evidenciando a possibilidade de utilização de uma configuração de manta menos densa, economizando material, para um mesmo resultado. Neste caso, quando utilizada a camada de ar de 50 e 100 mm o cenário não se repete, porém, é viável a utilização da manta de densidade intermediária em substituição da mais densa, mantendo o mesmo intervalo de capacidade de absorção sonora.

Gráfico 16 – Coeficientes de absorção sonora ponderados dos painéis de 65 mm nos tipos de montagem A, E50 e E100



Fonte: Elaborado pelo Autor

Avaliando os coeficientes de absorção sonora ponderados dos painéis de 65 mm de espessura, por meio do Gráfico 16, no tipo de montagem A (ausência de camada de ar entre as mantas e a superfície reflexiva), os mesmos resultados verificados nas mantas de menor espessura ocorreram, com elevada capacidade de absorção sonora e sem influência da densidade na absorção sonora. Como não houve alteração do coeficiente de absorção sonora ponderado, entre as amostras, o coeficiente de correlação r de Pearson e coeficiente de determinação foram zero.

Instalando os painéis com uma camada de ar de 50 mm, os resultados também foram constantes para as três densidades de manta propostas e houve redução de 0,05 no coeficiente de absorção sonora quando comparado o presente modo de instalação com o anterior. Novamente, com a ausência de variação entre o resultado de cada uma das composições de manta, os coeficientes de correlação e determinação foram zero, indicando que não há expectativa no aumento ou diminuição dos resultados com a alteração da densidade das amostras para o intervalo e quantidade de dados propostos.

Com a utilização de uma camada de ar de 100 mm houve redução de 0,05 no coeficiente de absorção sonora ponderado, em relação à instalação com camada de ar de 50 mm, para as amostras com densidade de 30 e 35 kg/m. Porém, neste caso, a capacidade de absorção sonora ponderada cresceu com o aumento da densidade dos painéis, com um coeficiente de correlação r de Pearson de +0,87, indicando correlação crescente forte entre α_w e a densidade dos painéis. O coeficiente de

determinação indica que 75% das variações que ocorreram entre o coeficiente de absorção sonora ponderado e a densidade das amostras são explicadas pelos dados presentes na análise.

De modo geral, com a inclusão e aumento da camada de ar entre as seções de manta e a superfície reflexiva os coeficientes de absorção sonora ponderados foram reduzidos. Tal redução foi de 0,05 com a adição de 50 mm de camada de ar e em 0,10 com a camada de ar de 100 mm (exceto para a amostra com manta de 40kg/m³ de densidade).

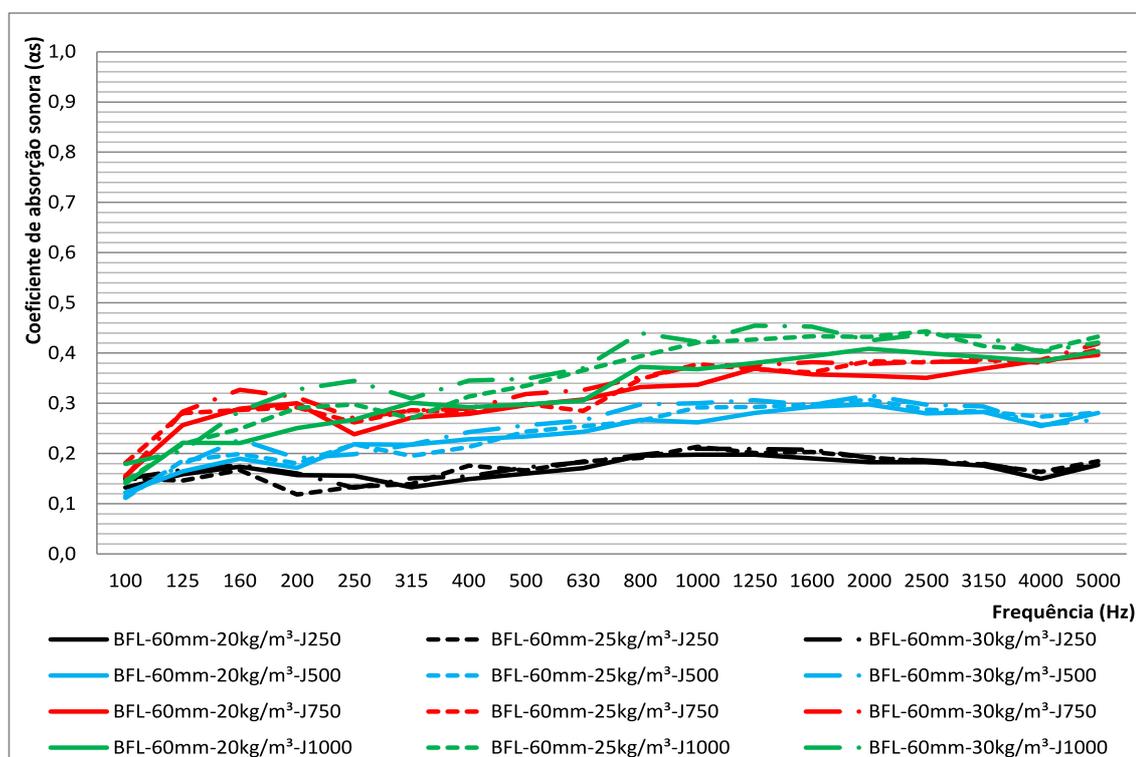
Por fim, verificando a influência da densidade das mantas de lã de PET nos coeficientes de absorção sonora ponderados, para as instalações sem e com camada de ar de 50 mm os resultados foram constantes mesmo com o incremento de densidade entre os materiais, possibilitando a utilização de mantas menos densas, gerando economia de recursos, para uma mesma faixa de absorção sonora. Ainda, isto não ocorre na condição com camada de ar de 100 mm, pois a amostra de maior densidade obteve um coeficiente de absorção sonora ponderado maior na amostra mais densa, mas, dentre as duas restantes, pode ser utilizada a manta de menor densidade para obter o mesmo desempenho.

4.2.2 Baffles

Considerando as mantas instaladas na forma de *baffle*, os coeficientes de absorção sonora, expressos por banda de um terço de oitava, no intervalo de bandas de frequência de 100 a 5.000 Hz, estão presentes para as amostras com espessura de 60 mm (Gráfico 17 a Gráfico 24) e 65 mm (Gráfico 25 a Gráfico 32), nas três densidades produzidas e nos quatro tipos de instalação propostos.

Desta forma, a análise dos resultados inicia com um comparativo geral das amostras de 60 mm de espessura, por meio do Gráfico 17, em todas as densidades e modos de montagem.

Gráfico 17 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 60 mm nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

Por meio do Gráfico 17, no qual estão presentes os *baffles* com 60 mm de espessura, é visível que, para as distâncias de espaçamento propostas, o espectro dos coeficientes de absorção sonora frente às bandas de frequência aumentou, em diferentes taxas entre os modos de instalação, das bandas de baixa para as de alta frequência. Desta forma, o comportamento da capacidade de absorção sonora dos *baffles* avaliados ocorreu, mesmo que atingindo resultados inferiores, de forma similar aos reportados por Knauf-AMF (2019), Armstrong (2020) e Ecophon (2020).

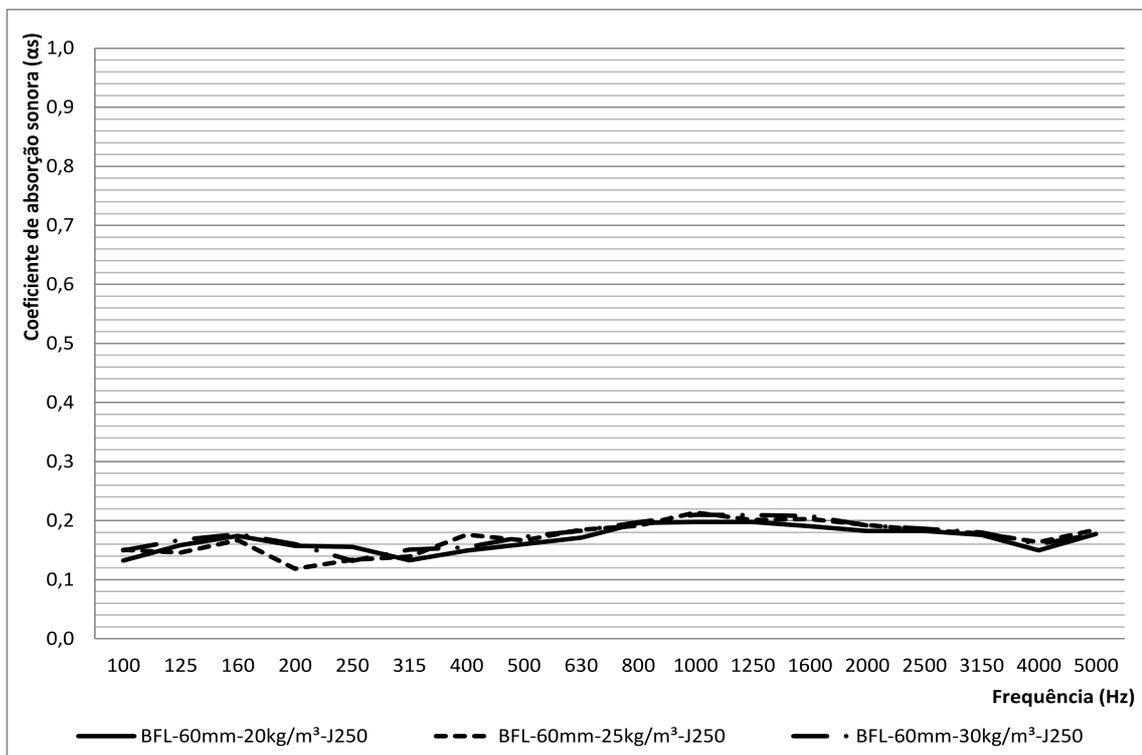
Ainda, apesar de haver grande variação nos coeficientes de absorção sonora das amostras dentre os espaçamentos entre fileiras de *baffle*, a influência da densidade das mantas utilizadas esteve presente. Neste caso, resultados mais elevados foram obtidos quanto maior a densidade das mesmas, na maioria das bandas de frequência analisadas, confirmando o comportamento esperado para materiais fibrosos (KOIZUMI; TSUJIUCHI; ADACHI, 2002; SEDDEQ, 2009; EVEREST; POHLMANN, 2015).

Por fim, o espaçamento entre as fileiras de *baffle* se mostrou como um fator determinante para a capacidade de absorção sonora, sendo o espaçamento de 25

cm, equivalente a metade da altura das amostras, a configuração com os menores coeficientes de absorção sonora. Aumentando o espaçamento entre fileiras para distâncias iguais ou maiores que a altura dos *baffles* resultou em maiores coeficientes de absorção sonora quanto maior o espaçamento, conforme esperado por Egan (2007) e pelos dados de Knauf-AMF (2019).

Como a quantidade de resultados presente no Gráfico 17 é elevada, os coeficientes de absorção sonora foram separados e agrupados em função da densidade, para o mesmo modo de instalação, e do distanciamento entre as fileiras de *baffle* de mesma densidade.

Gráfico 18 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 60 mm nos tipos de montagem J250



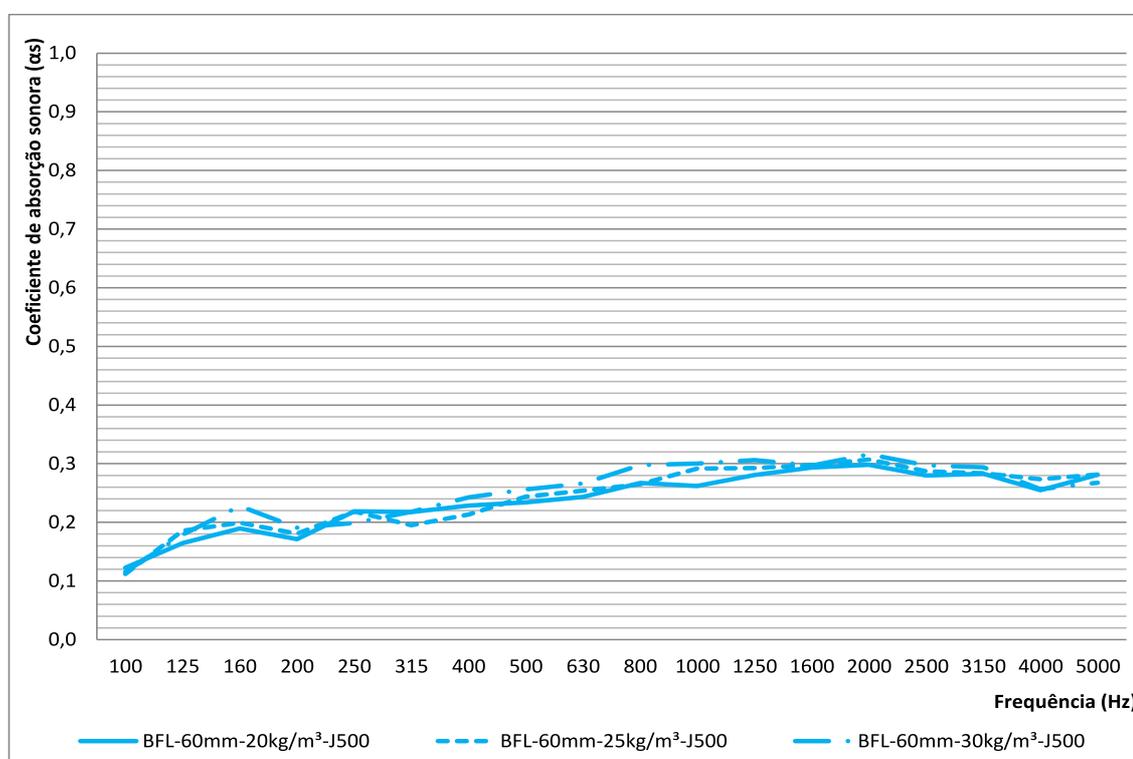
Fonte: Elaborado pelo Autor

Analisando os *baffles* de 60 mm de espessura com espaçamento de 25 cm (montagem J250), presentes no Gráfico 18, as amostras obtiveram coeficiente de absorção sonora próximo na banda de 100 Hz. Em 125 e 160 Hz a amostra com densidade de 30 kg/m³ obteve a maior capacidade de absorção, sendo seguida pela amostra de menor densidade em 200 e 250 Hz. Nesta faixa os *baffles* com os menores coeficientes de absorção sonora, incluindo uma perda acentuada de capacidade de absorção na banda de 200 Hz foram os de 25 kg/m³.

Nas bandas de frequência seguintes as composições de manta alternam a posição de maior capacidade de absorção sonora e possuem espectro similar frente às frequências, com ganhos e perdas em proporção análoga.

De modo geral, neste tipo de instalação, as amostras com 60 mm de espessura possuíram coeficientes de absorção sonora que não ultrapassaram 0,23 (obtido pelo *baffle* de 25 kg/m³ na banda de 1.000 Hz), com um comportamento crescente de 100 a 160 Hz, possuindo queda até 315 Hz e aumentando até a faixa de 1.000 a 1.600 Hz, e voltam a decair até 4.000 Hz com aumento em 5.000 Hz.

Gráfico 19 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 60 mm nos tipos de montagem J500



Fonte: Elaborado pelo Autor

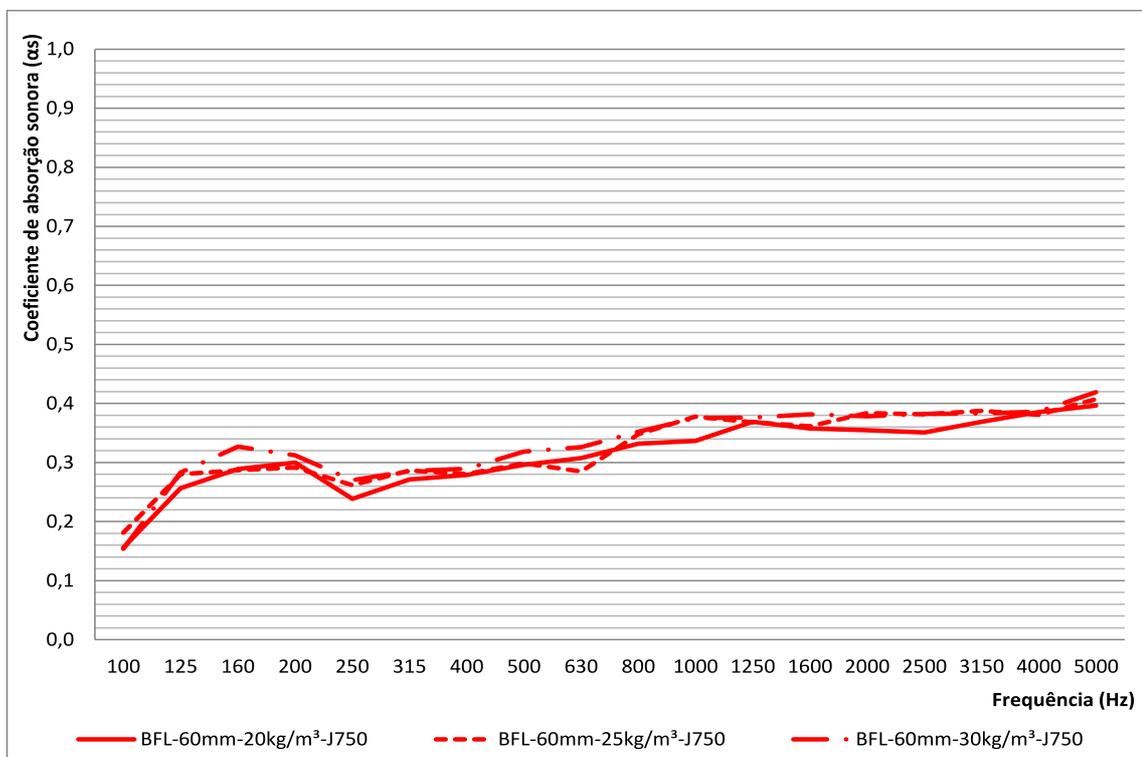
No Gráfico 19 estão presentes os *baffles* com 60 mm de espessura e espaçamento de 50 cm entre as seções, no qual as amostras tem praticamente o mesmo coeficiente de absorção sonora na banda de 100 Hz e possuem aumento na capacidade de absorção até a banda de 160 Hz e queda pontual em 200 Hz. Nesta faixa, quanto maior a densidade das mantas maior foi a capacidade de absorção sonora.

Considerando as bandas de 200 a 2.000 Hz todas as composições de *baffle* obtiveram crescimento dos seus coeficientes de absorção sonora (salvo quedas

pontuais em algumas bandas de frequência para as amostras de 20 e 25 kg/m³) e, na maioria das bandas de frequência deste intervalo, quanto maior a densidade dos *baffles* maior foi a sua capacidade de absorção sonora.

Na faixa de 2.000 a 4.000 Hz todas as amostras possuíram redução nos seus coeficientes de absorção sonora, sendo que a composição com densidade de 30 kg/m³, de 2.000 a 3.150 Hz, e a com 25 kg/m³, em 4.000 Hz, obtiveram a maior capacidade de absorção sonora. Já na banda de 5.000 Hz as três composições obtiveram ganho nos seus coeficientes de absorção sonora.

Gráfico 20 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 60 mm nos tipos de montagem J750



Fonte: Elaborado pelo Autor

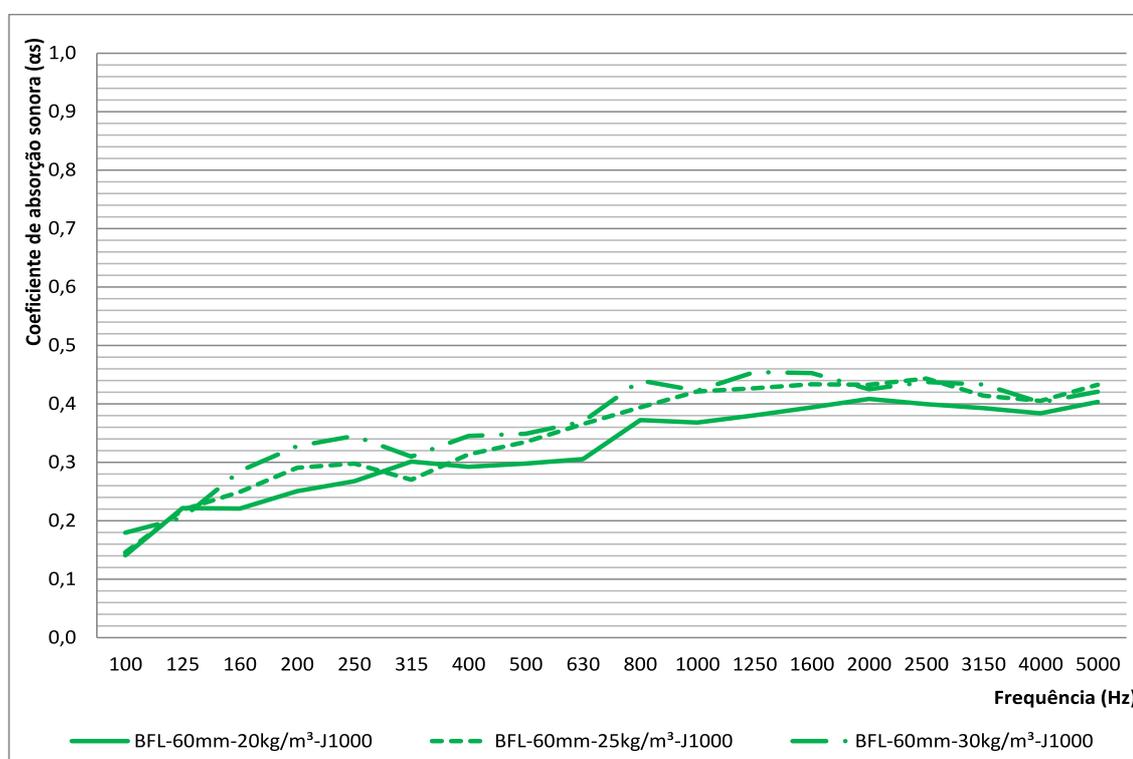
Com um espaçamento de 75 cm entre as fileiras de *baffles* de 60 mm de espessura os coeficientes de absorção sonora (Gráfico 20) obtiveram aumento substancial em todas as bandas de frequência.

As amostras obtiveram comportamento similar em todas as bandas de frequência, com aumento da capacidade de absorção sonora de 100 a 160 Hz, para a amostra com densidade de 30 kg/m³, e de 100 a 200 Hz, para as demais. Nesta faixa, a amostra com densidade de 25 kg/m³ obteve os maiores resultados na banda de 100 e 125 Hz, e a amostra com 30 kg/m³ nas bandas de 160 a 250 Hz.

Os resultados foram reduzidos na banda de 250 Hz e aumentaram, com espectro similar, seus coeficientes de absorção até 1.250 Hz, sofrendo apenas uma queda pontual na banda de 630 Hz na amostra com 25 kg/m³ de densidade.

Nas bandas de alta frequência a amostra com densidade de 20 kg/m³ obteve sutil decréscimo nos seus coeficientes de absorção sonora da banda de 1.250 a 2.500 Hz, aumentando até 5.000 Hz. Já as amostras de maior densidade obtiveram resultados praticamente constantes (salvo uma perda pontual na banda de 1.600 Hz na amostra de 25 kg/m³) até a banda de 4.000 Hz, sofrendo aumento até 5.000 Hz.

Gráfico 21 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 60 mm nos tipos de montagem J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com espaçamento de 100 cm, as amostras com espessura de 60 mm (Gráfico 21) de maior densidade obtiveram capacidade de absorção sonora crescente da banda de 100 a 250 Hz, seguido de uma perda pontual na banda de 315 Hz e crescimento até seu ponto máximo na banda de 1.600 Hz, para a amostra de 30 kg/m³ de densidade e até 2.500 Hz, para a amostra de 25 kg/m³.

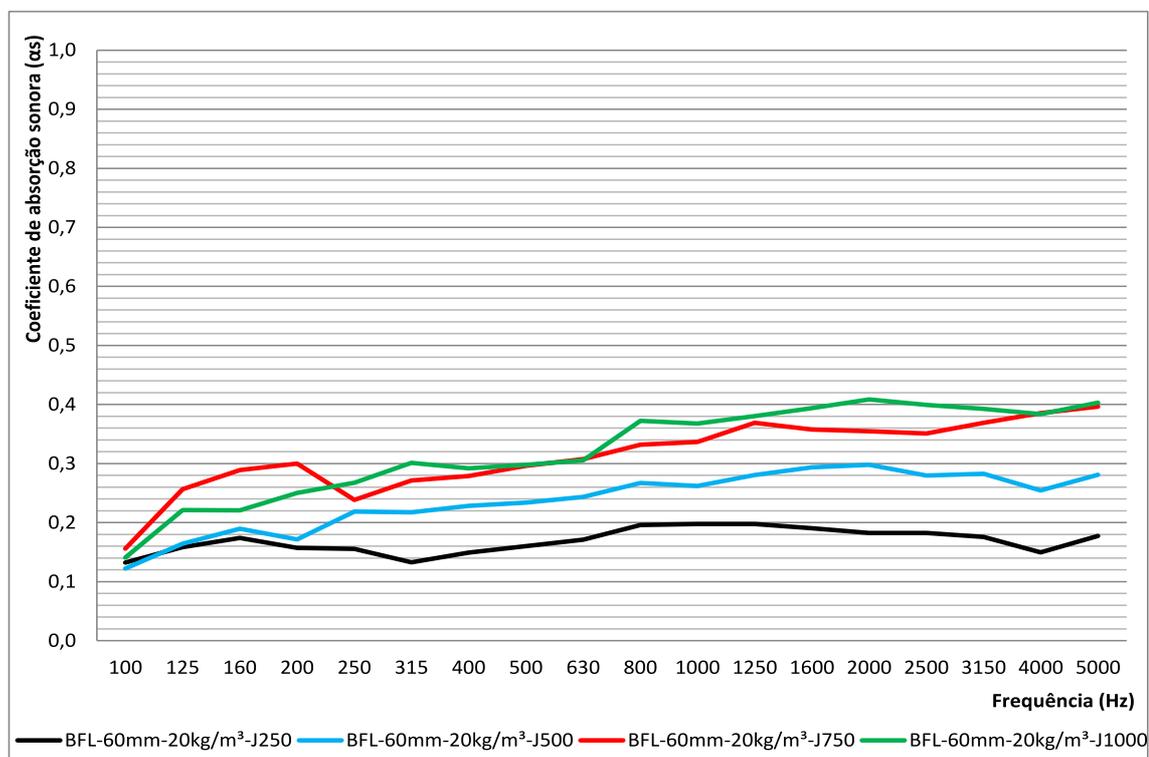
Após o pico no resultado, a capacidade de absorção da amostra de 25 kg/m³ reduziu até a banda de 4.000 Hz e sofreu aumento em 5.000 Hz. E a amostra de 30

kg/m³ sofreu aumento na capacidade de absorção na banda de 2.000 a 2.500 Hz, com queda até a banda de 4.000 Hz, seguida de aumento até a banda de 5.000 Hz.

No intervalo de frequências analisado, na maioria das bandas, quanto maior foi a densidade das mantas maior foi a capacidade de absorção sonora. Neste sentido, a amostra com densidade de 20 kg/m³ obteve os resultados mais modestos, com crescimento dos resultados com o aumento das frequências, havendo quedas em 400, 1.000 e 4.000 Hz, reestabelecendo o crescimento nas bandas seguintes.

Efetuada a análise dos *baffles* de 60 mm em função da sua densidade, se faz necessária a análise da influência do espaçamento entre fileiras de material.

Gráfico 22 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 60 mm e 20 kg/m³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

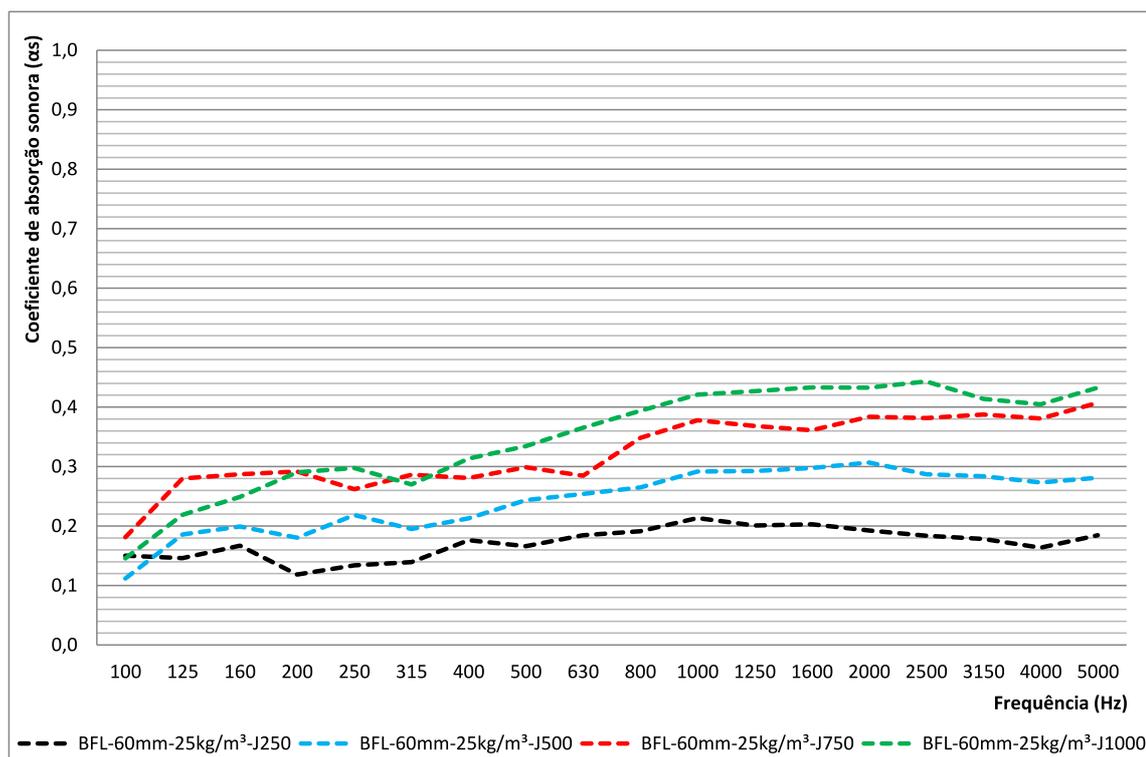
Com *baffles* de 60 mm de espessura e densidade de 20 kg/m³, nas bandas de baixa frequência, no espaçamento de 75 cm, obtiveram os maiores coeficientes de absorção sonora, com o crescimento das bandas de 100 a 200 Hz, seguida pelos espaçamentos de 100, 50 e 25 cm, que não obtiveram aumento da capacidade de absorção tão expressivo e, algumas, sofreram redução na banda de 200 Hz.

A partir da banda de 250 até 5.000 Hz a amostra com espaçamento de 100 cm obteve a maior capacidade de absorção sonora na maioria das bandas de frequência, sendo seguida pelos *baffles* com distância de 75, 50 e 25 cm.

Para todos os quatro modos de instalação, nas bandas de média frequência, apesar de variações em algumas faixas, houve aumento da capacidade de absorção sonora neste intervalo, sendo a taxa mais elevada para as composições com maior espaçamento entre as seções de material.

Após os maiores resultados a capacidade de absorção sonora diminuiu, ocorrendo em três bandas de um terço de oitava seguidas para as amostras com espaçamento de 50, 75 e 100 cm, e em 5 bandas de um terço de oitava para a montagem J250, sendo sucedida, em todos os casos, até a banda de 5.000 Hz.

Gráfico 23 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 60 mm e 25 kg/m³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

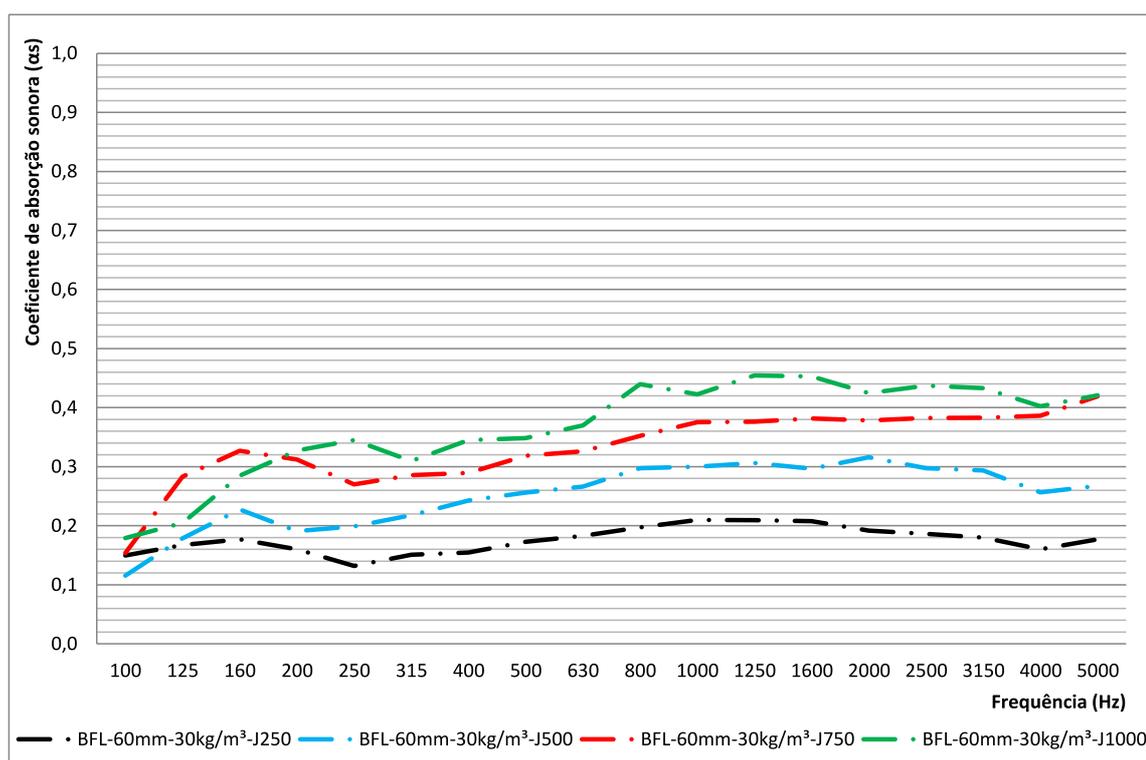
Com os *baffles* de densidade 25 kg/m³ e 60 mm de espessura, o comportamento dos coeficientes de absorção sonora, presentes no Gráfico 23, foi similar, em que os maiores resultados nas bandas de 100 a 200 Hz foram obtidos pelo sistema com espaçamento de 75 cm, seguido pelos de 100, 75 e 25 cm (exceto na banda de 100 Hz).

Nas bandas seguintes, de 250 a 5.000 Hz, os sistemas instalados com maior espaçamento obtiveram os maiores resultados em todas as bandas de frequência (exceto na banda de 315 Hz).

Nesta faixa, mesmo com variação em determinadas bandas de frequência, as composições obtiveram aumento da sua capacidade de absorção sonora, ocorrendo até a banda de 2.500 Hz, para o tipo de montagem J1000, até 5.000 Hz, para a amostra com espaçamento de 75 cm, até 2.000 Hz, considerando a instalação J500, e apenas até 1.000 Hz para o sistema com menor espaçamento.

Com exceção dos *baffles* com espaçamento de 75 cm entre as fileiras, os coeficientes de absorção sonora foram reduzidos após as bandas de média frequência até a banda de 4.000 Hz, sofrendo recuperação na banda de 5.000 Hz.

Gráfico 24 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 60 mm e 30 kg/m³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

Analisando os coeficientes de absorção sonora dos *baffles* com 30 kg/m³ de densidade e espessura de 60 mm (Gráfico 24), da banda de 100 a 160 Hz as amostras obtiveram aumento da capacidade de absorção sonora, sendo seguido por redução nas bandas seguintes (exceto para a amostra instalada com espaçamento de 100 cm que obteve crescimento dos resultados até a banda de 250 Hz).

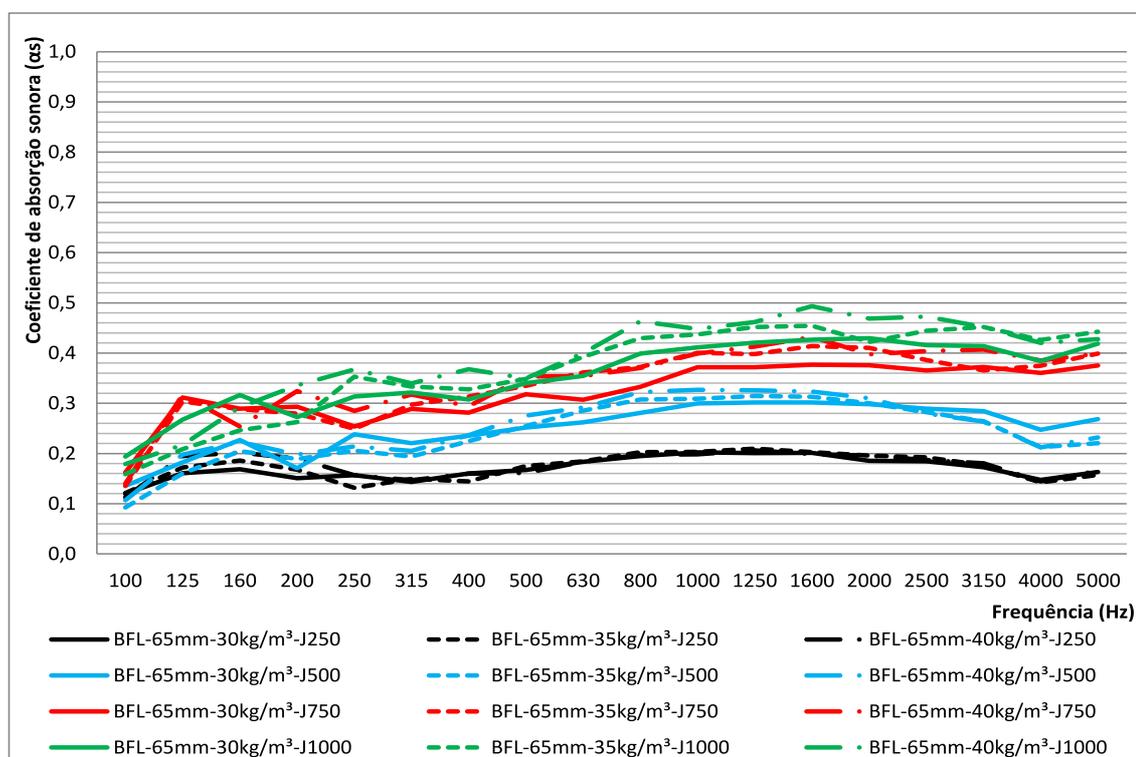
Nas bandas baixas frequências, salvo em algumas bandas, os maiores resultados foram obtidos pelo sistema com espaçamento de 75 cm, seguido pelo com 100, 50 e 25 cm.

E nas bandas de média frequência, todas as amostras obtiveram ganhos na capacidade de absorção sonora em proporção similar, exceto na configuração com espaçamento de 100 cm entre as fileiras de *baffles* que possuiu variações em seus coeficientes de absorção sonora nesta faixa de bandas de frequência. Neste caso, os maiores coeficientes de absorção sonora foram obtidos quanto maior foi o espaçamento entre as fileiras de *baffle*.

Após os coeficientes de absorção sonora máximos, obtidos nas bandas de 1.000 a 2.000 Hz, os resultados decaíram até a banda de 4.000 Hz e sofreram recuperação até 5.000 Hz para as amostras nos tipos de instalação J250, J500 e J1000. Já o sistema com espaçamento de 75 cm possuiu redução na taxa de aumento de sua capacidade de absorção sonora da banda de 1.000 até 3.150 Hz e voltou a aumentar até a banda limite de alta frequência.

Efetuada a análise dos coeficientes de absorção sonora dos *baffles* com espessura de 60 mm, no Gráfico 25 estão presentes os resultados para as amostras com 65 mm de espessura, com as três composições de densidade propostas e instaladas nos mesmos tipos de montagem supracitados. Novamente, o presente gráfico promove uma análise geral do comportamento da capacidade de absorção sonora dos sistemas em função da sua densidade e do distanciamento entre as fileiras de *baffles*.

Gráfico 25 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 65 mm nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

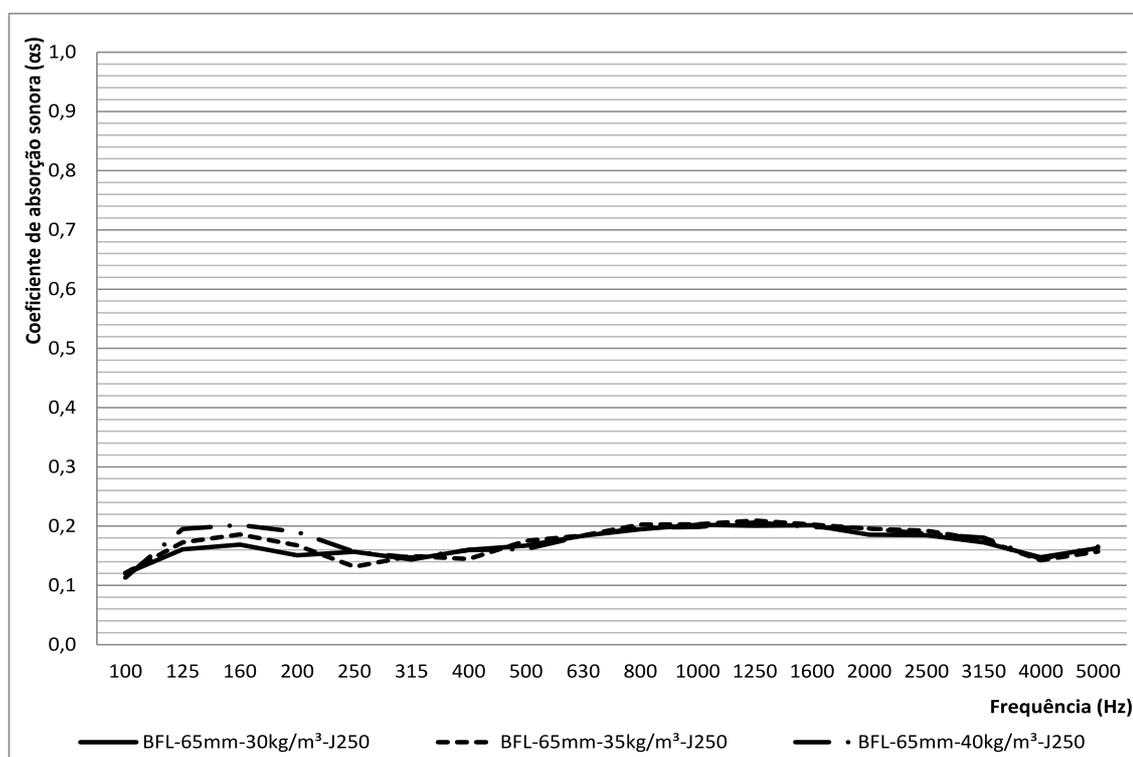
Com os coeficientes de absorção sonora das amostras com 65 mm de espessura presentes no Gráfico 25 é possível verificar que, considerando todas as formas de instalação, o espectro de cada uma das amostras, frente o intervalo de bandas de frequência analisado, aumentou com as frequências, mesmo que em proporção diferente entre as composições ensaiadas. Sendo assim, a capacidade de absorção sonora dos *baffles* ensaiados foi crescente das baixas para as altas frequências, assumindo comportamento similar ao presente nos dados de Knauf-AMF (2019), Armstrong (2020) e Ecophon (2020).

Quando considerado o impacto da densidade das mantas utilizadas para composição dos *baffles*, mesmo com grande variação na capacidade de absorção sonora das amostras entre os tipos de montagem, esta se mostrou influente. Neste caso, para a maioria das bandas de frequência analisadas, o aumento na densidade resultou em maiores coeficientes de absorção, conforme esperado para materiais fibrosos (KOIZUMI; TSUJIUCHI; ADACHI, 2002; SEDDEQ, 2009; EVEREST; POHLMANN, 2015).

Ainda, quanto ao espaçamento entre as fileiras de *baffles*, os resultados seguiram o comportamento esperado por Egan (2007) e verificado por Knauf-AMF (2019), em que os coeficientes de absorção sonora foram baixos quando do uso de uma distância equivalente à metade da altura dos sistemas e aumentaram quando do uso de espaçamentos iguais ou maiores a sua altura.

Da mesma forma que o caso anterior, o número de dados plotados no Gráfico 25 é elevado, então os coeficientes de absorção sonora nele presentes foram fracionados em função da densidade dos *baffles* instalados com o mesmo espaçamento e pela distância entre fileiras de amostras com mesma densidade.

Gráfico 26 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 65 mm nos tipos de montagem J250



Fonte: Elaborado pelo Autor

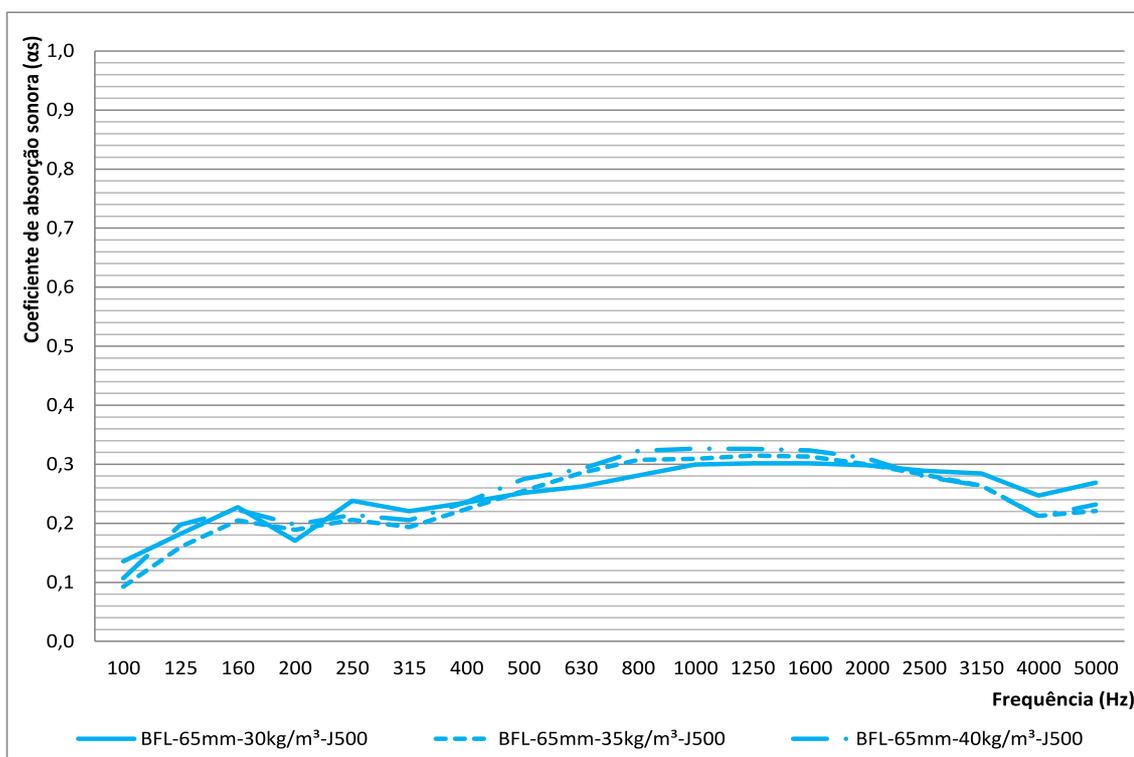
Na instalação com 25 cm de distanciamento entre as fileiras de *baffles* com espessura de 65 mm, os coeficientes de absorção sonora (Gráfico 26) foram praticamente os mesmos na banda de 100 Hz e aumentaram até a banda de 160 Hz em todas as amostras de diferentes densidades. Nesta faixa, quanto maior foi a densidade das mantas maiores foram seus resultados.

Após a banda de 160 Hz as amostras perderam capacidade de absorção sonora até a banda de 250 Hz (exceto para a amostra com densidade de 30 kg/m³)

e recuperaram sua capacidade de absorção, de forma crescente, até a banda de 1.250 Hz. Em sequência, os coeficientes de absorção sonora voltaram a cair até a banda de 4.000 Hz com leve recuperação em 5.000 Hz.

De modo geral, as amostras de diferentes densidades obtiveram o mesmo comportamento e coeficientes de absorção sonora similares nas bandas de média e alta frequência, diferindo, mais substancialmente, na faixa de 125 a 315 Hz.

Gráfico 27 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 65 mm nos tipos de montagem J500



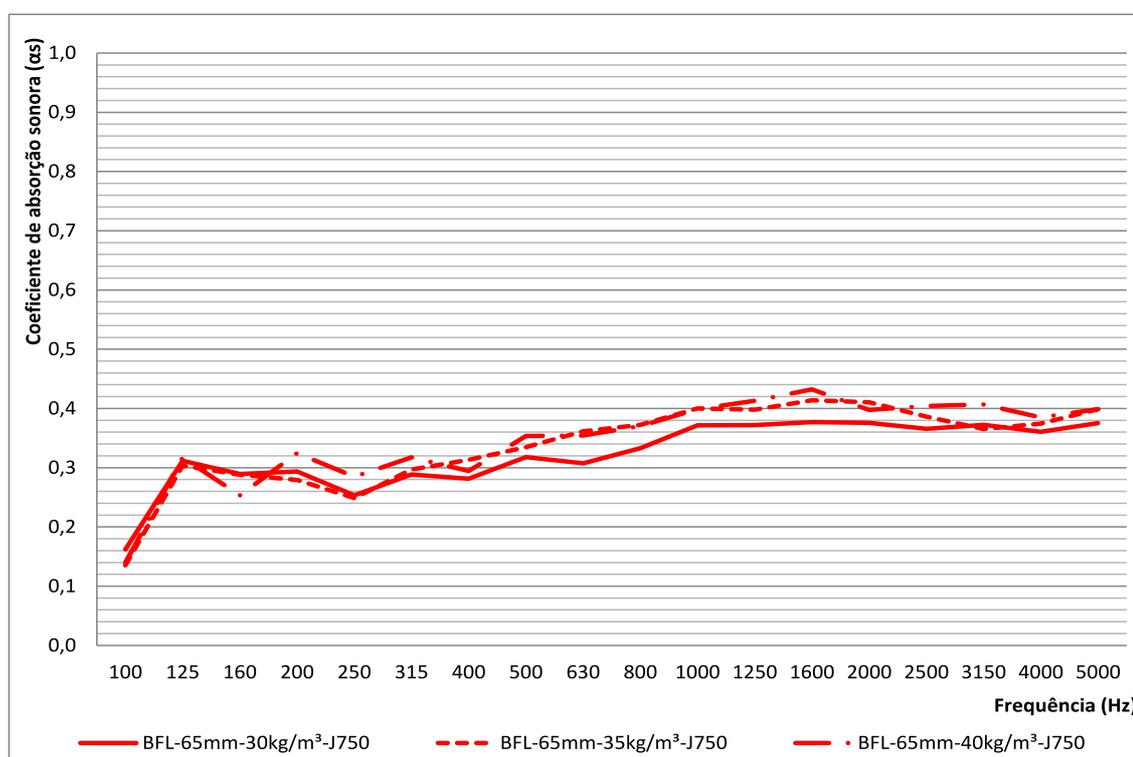
Fonte: Elaborado pelo Autor

Para as amostras, de 65 mm de espessura, montadas com espaçamento de 50 cm entre as fileiras, seus coeficientes de absorção sonora estão presentes no Gráfico 27, no qual as amostras possuem aumento da capacidade de absorção da banda de 100 a 160 Hz, havendo queda pontual na banda de 200 Hz, sucedida de uma recuperação na banda de 250 Hz e nova perda de desempenho na banda de 315 Hz.

Nesta faixa, de 100 a 315 Hz, a capacidade de absorção sonora das amostras oscilou, sendo que a amostra de menor e a de maior densidade as que obtiveram os maiores resultados, ficando os *baffles* de 35 kg/m³ os que obtiveram os menores resultados (exceto na banda de 200 Hz).

A partir da banda de 315 Hz, as amostras voltaram a aumentar seus coeficientes de absorção sonora até a banda de 1.600 Hz, sendo que quanto maior a densidade do material maior foi sua capacidade de absorção. Após esta faixa a capacidade de absorção sonora dos presentes *baffles* reduziu até a banda de 4.000 Hz com recuperação em 5.000 Hz. Nesta faixa a amostra de menor densidade obteve os maiores coeficientes de absorção sonora.

Gráfico 28 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 65 mm nos tipos de montagem J750



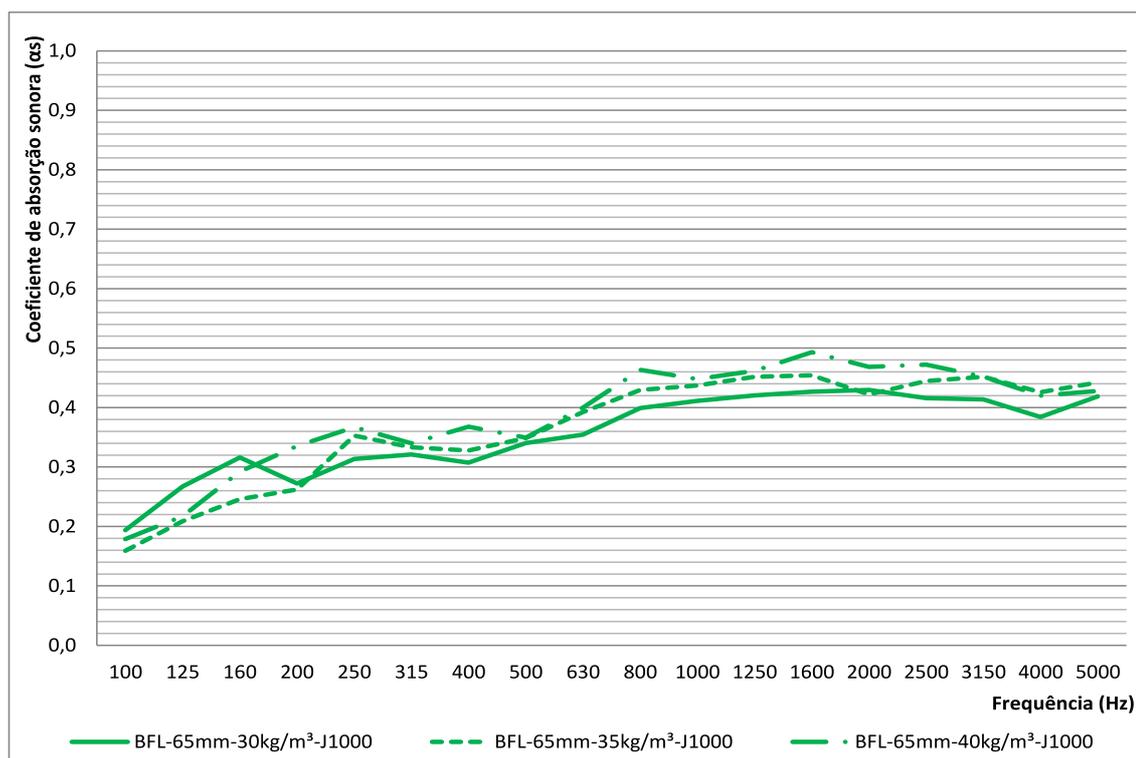
Fonte: Elaborado pelo Autor

Aumentando o espaçamento entre as fileiras de *baffle* para 75 cm, mantendo a espessura das amostras em 65 mm, a capacidade de absorção sonora (Gráfico 28) aumentou da banda de 100 a 125 Hz, decaindo até a banda de 250 Hz (exceto para amostra com densidade de 40 kg/m³ que obteve um ganho pontual na banda de 200 Hz).

Partindo da banda de 250 até 1.600 Hz, com algumas variações nas amostras com densidade de 30 e 40 kg/m³, os coeficientes de absorção aumentaram até seu ponto máximo. Nesta faixa as composições com densidade de 35 e 40 kg/m³ obtiveram os maiores resultados, seguidas pela amostra de 30 kg/m³.

Nas altas frequências a capacidade de absorção sonora praticamente se manteve constante para os *baffles* com 30 e 40 kg/m³ e para a amostra de 35 kg/m³ houve perda até a banda de 3.150 Hz. Um aumento no coeficiente de absorção sonora ocorreu em todas as amostras na banda de 5.000 Hz.

Gráfico 29 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 65 mm nos tipos de montagem J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

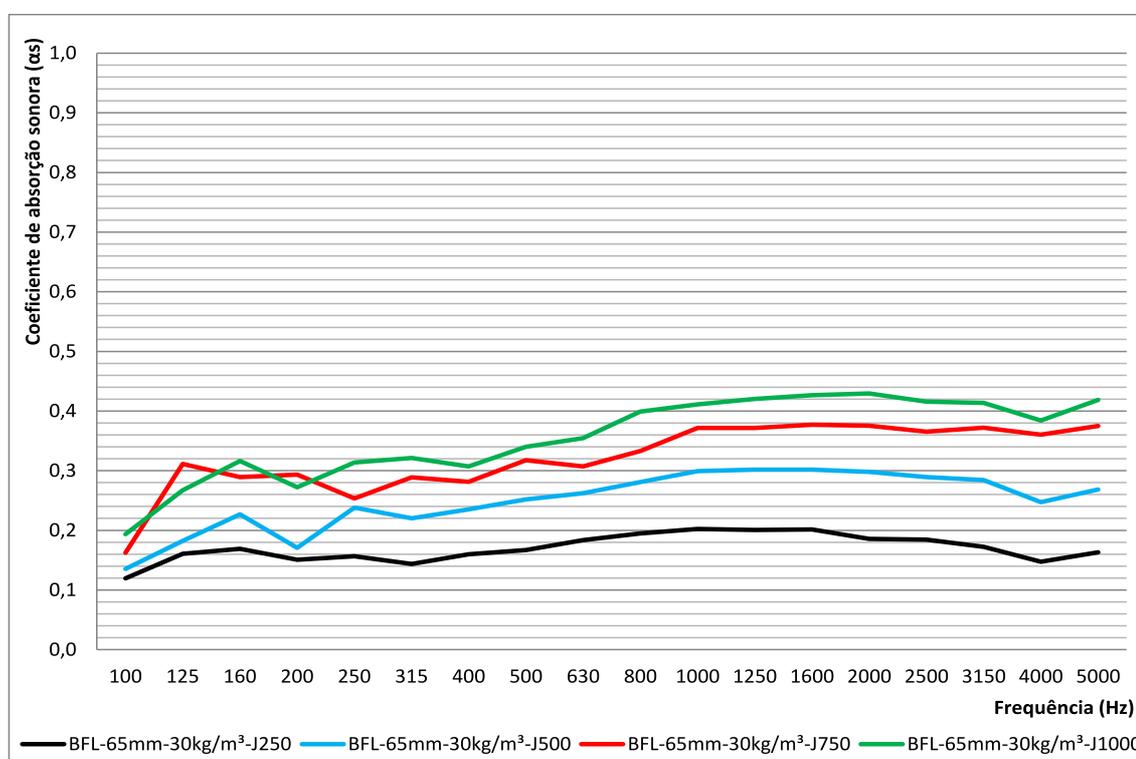
Por fim, avaliando o impacto da densidade na capacidade de absorção sonora nos *baffles* de 65 mm com espaçamento de 100 cm entre as fileiras (Gráfico 29), as amostras com densidade de 35 e 40 kg/m³ obtiveram aumento dos seus coeficientes de absorção sonora da banda de 100 a 250 Hz, sendo a mais densa responsável pelos maiores resultados. Já a amostra de menor densidade obteve os maiores resultados de 100 a 160 Hz, sofrendo redução na banda de 200 Hz, sucedida de aumento novamente.

Nas bandas de média frequência todas as amostras obtiveram aumento de seus coeficientes de absorção sonora, com variações entre as bandas de frequência, até as bandas de alta frequência, nas quais houve redução na capacidade de absorção sonora até a banda de 4.000 Hz e retomada na banda de 5.000 Hz.

Em praticamente todas as bandas de frequência (com exceção da faixa de 100 a 160 Hz) quanto maior foi a densidade das mantas que constituem os *baffles* maior foram os coeficientes de absorção sonora das amostras testadas.

Após a análise da influência da densidade dos *baffles* com espessura de 65 mm, nos quatro modos de instalação propostos, nos coeficientes de absorção sonora das amostras, a avaliação do impacto do tipo de montagem em amostras de mesma densidade, na presente espessura, inicia por meio do Gráfico 30, com amostras de 30 kg/m³.

Gráfico 30 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 65 mm e 30 kg/m³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com os quatro espaçamentos distintos entre as fileiras de *baffles*, com amostras de 65 mm de espessura e densidade de 30 kg/m³, os coeficientes de absorção sonora estão presentes no Gráfico 30. Neste caso, as amostras obtiveram aumento da capacidade de absorção sonora de 100 até 160 Hz (exceto para o tipo de montagem J750 que ocorreu somente até 125 Hz).

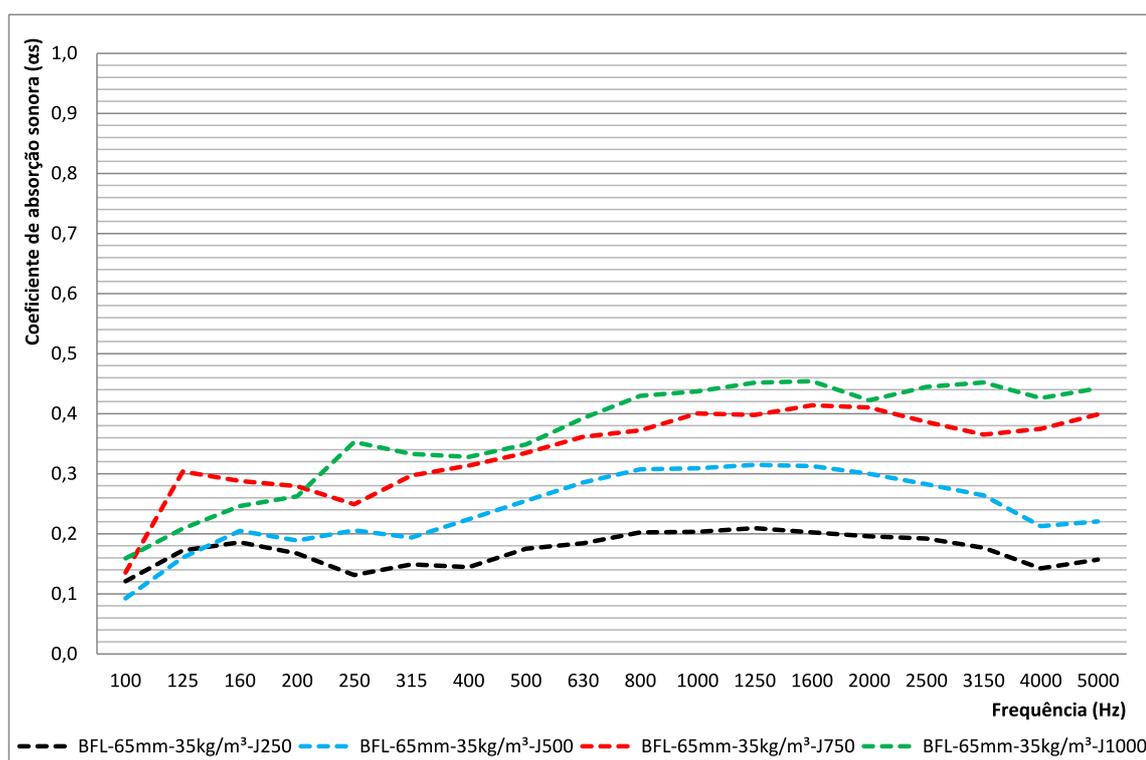
Após o resultado máximo nas baixas frequências, as amostras sofreram redução em sua capacidade de absorção sonora até a banda de 200 Hz, para os

espaçamentos de 75 e 100 cm, até 250 Hz, para a instalação J750, e até 315 Hz, para o menor espaçamento.

Nas bandas de média frequência as amostras obtiveram aumento dos seus coeficientes de absorção sonora, com variações nas configurações com espaçamento de 75 e 100 cm, sofreram redução até a banda de 4.000 Hz e leve aumento na banda de 5.000 Hz.

Nesta composição de *baffle*, para o intervalo de bandas de frequência de um terço de oitava considerado, quanto maior o espaçamento entre as fileiras de material maiores foram os coeficientes de absorção sonora (exceto nas bandas de 125 e 200 Hz nas quais a amostra com espaçamento de 75 cm obteve maior resultado em comparação com a instalada no tipo de montagem J1000).

Gráfico 31 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 65 mm e 35 kg/m³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

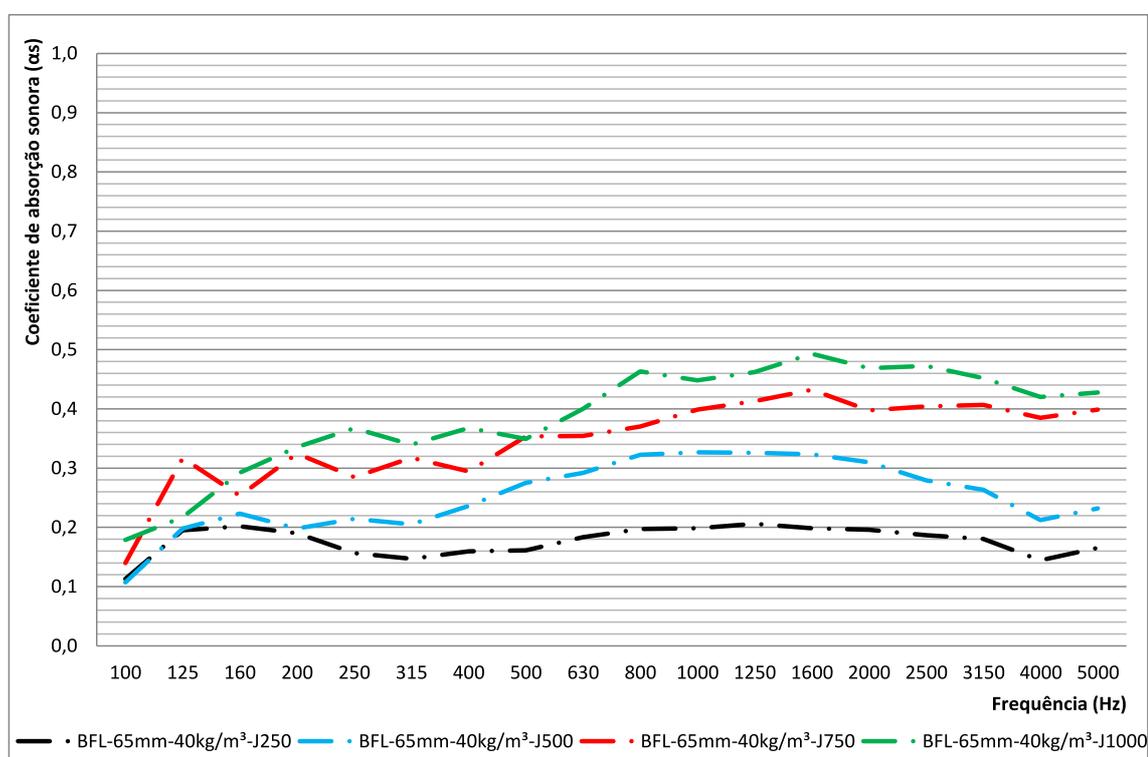
Para as amostras de 65 mm de espessura e densidade intermediária, dentre as propostas, os coeficientes de absorção sonora, para os diferentes espaçamentos, estão ilustrados por meio do Gráfico 31, em que, nas baixas frequências, a amostra com espaçamento de 75 cm obteve aumento da capacidade de absorção da banda de 100 a 160 Hz. Já os *baffles* instalados no tipo de montagem J250 e J500

obtiveram resultados crescentes de 100 a 160 Hz e as amostras com espaçamento de 100 cm da banda de 100 a 250 Hz.

Nas baixas frequências, após os maiores resultados, as amostras obtiveram perda e variação na capacidade de absorção sonora em algumas faixas de bandas de frequência, ocorrendo de 200 a 400 Hz para o tipo de montagem J250, de 200 a 315 Hz para a instalação J500. No caso do espaçamento de 75 cm entre as fileiras de *baffle* a perda de desempenho foi pontual, na banda de 250 Hz, e de 315 a 500 Hz para o espaçamento de 100 cm.

Após as perdas reportadas entre as baixas e médias frequências, os coeficientes de absorção sonora das amostras aumentaram até o início das bandas de alta frequência, região em que, novamente, houve redução na capacidade de absorção em todas as configurações testadas e leve recuperação na banda de 5.000 Hz.

Gráfico 32 – Coeficientes de absorção sonora dos *baffles* de 65 mm e 40 kg/m³ nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

Por fim, com os coeficientes de absorção sonora das amostras de manta com densidade de 40 kg/m³ e espessura de 65 mm no Gráfico 32, os *baffles* instalados com espaçamento de 25 e 50 cm obtiveram resultados crescentes da banda de 100

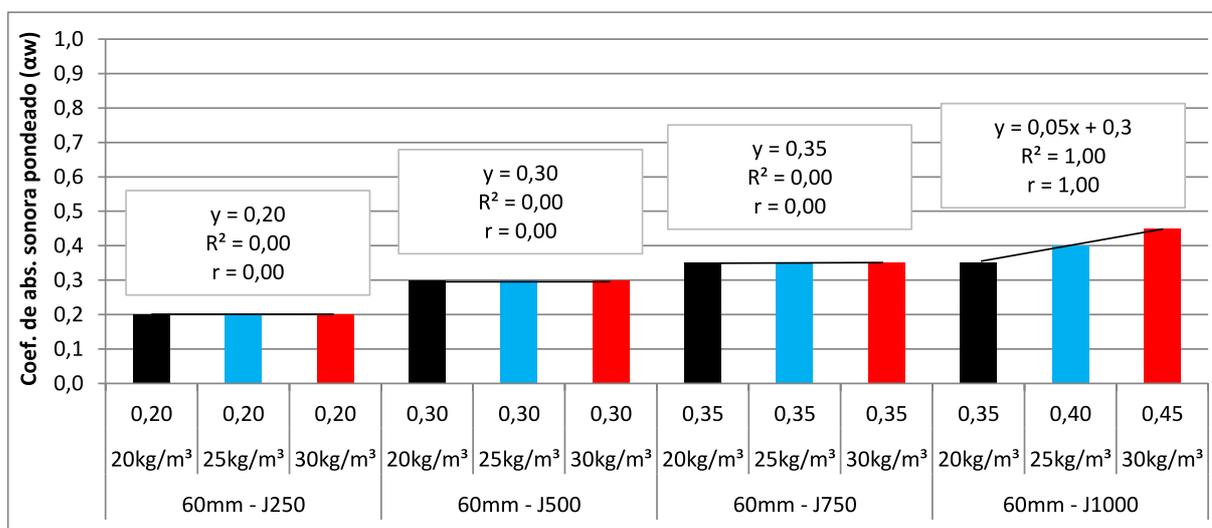
a 160 Hz. Na configuração de espaçamento de 75 cm o aumento foi de 100 a 125 Hz e de 100 a 250 Hz para a amostra com maior espaçamento.

Na sequência dos valores máximos nas bandas de baixa frequência, as amostras obtiveram redução e variação na sua capacidade de absorção sonora em faixas de até cinco bandas de um terço de oitava, sendo seguida por aumento na capacidade de absorção sonora. O aumento nos resultados ocorreu até a banda de 1.250 Hz para a montagem tipo J250, até 800 Hz na instalação J500 e até a banda de 1.600 Hz para as composições com espaçamento de 75 e 100 cm.

Com os maiores coeficientes de absorção sonora, ocorrendo nas bandas de frequência mencionadas acima, a capacidade de absorção de todas as configurações de espaçamento decaiu até a banda de 4.000 Hz, havendo sutil aumento na banda de 5.000 Hz.

Finalizada a análise dos coeficientes de absorção sonora por bandas de um terço de oitava, com as composições de *baffle* e modos de instalação propostos, se faz possível a avaliação dos seus resultados ponderados. Tais coeficientes de absorção sonora ponderados estão presentes no Gráfico 33 para as amostras com espessura de 60 mm e no Gráfico 34 para as com 65 mm de espessura. Desta forma, estes resultados promovem uma avaliação simplificada do impacto da densidade das mantas e do espaçamento entre as fileiras de *baffles* na capacidade de absorção sonora.

Gráfico 33 – Coeficientes de absorção sonora ponderados dos *baffles* de 60 mm nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

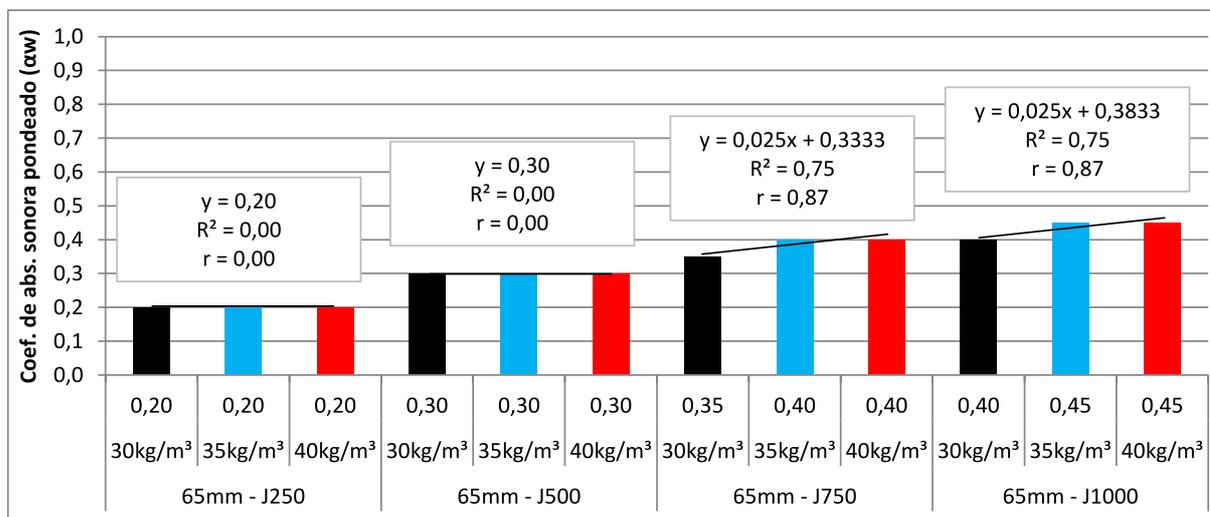
Com os coeficientes de absorção sonora ponderados dos *baffles* com espessura de 60 mm, presentes no Gráfico 33, para as amostras instaladas com espaçamento de 25, 50 e 75 cm não houve aumento dos resultados com o aumento da densidade das mantas de lã de PET. Desta forma, o coeficiente de correlação r de Pearson e coeficiente de determinação são iguais à zero, visto que os valores se mantiveram constantes no eixo das ordenadas.

Já para os *baffles* instalados com espaçamento de 100 cm, entre as suas fileiras, os coeficientes de absorção sonora ponderados aumentaram em 0,05 com incrementos de 5 kg/m^3 na densidade das amostras. Neste caso, o coeficiente de correlação r de Pearson evidencia uma perfeita correlação linear entre a densidade e o coeficiente de absorção sonora ponderado, para o intervalo e quantidade de dados propostos, sendo esperado, mesmo que com uma taxa reduzida (0,05x), aumento na capacidade de absorção sonora com aumento da densidade das mantas. Ainda, o coeficiente de determinação evidencia que todas as variações presentes na iteração dos dois parâmetros, para o intervalo e quantidade de dados proposta, são explicadas pelos dados.

Neste caso, comparando os quatro modos de instalação propostos, o aumento de 25 cm na distância entre as fileiras de *baffle*, para todas as composições de amostras, resultou em aumento nos coeficientes de absorção sonora ponderados, ou seja, quanto maior foi o espaçamento maior foi o resultado, para o intervalo analisado.

Ainda, ao analisar o impacto da densidade das mantas de lã de PET nos valores ponderados, fica evidente que, para os espaçamentos de 25, 50 e 75 cm, o aumento da densidade do material não resultou em variação do desempenho, sendo que a utilização de uma manta menos densa gera economia e permanece em um mesmo nível de desempenho. Neste caso, para o espaçamento de 100 cm tal comportamento não ocorreu, visto que quanto maior foi a densidade da manta maior foi o resultado.

Gráfico 34 – Coeficientes de absorção sonora ponderados dos *baffles* de 65 mm nos tipos de montagem J250, J500, J750 e J1000



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para os *baffles* constituídos por mantas de 65 mm de espessura seus coeficientes de absorção sonora ponderados estão presentes no Gráfico 34, em que, para os espaçamentos de 25 e 50 cm entre as fileiras de *baffle*, não houve alteração dos resultados com variação da densidade do material. Sendo assim, tanto o coeficiente de correlação r de Pearson quanto o coeficiente de determinação foram zero, não havendo interação entre as duas variáveis presentes.

E para os sistemas instalados com espaçamento de 75 e 100 cm, o aumento da densidade das mantas que constituem os *baffles* resultou em aumento nos coeficientes de absorção sonora ponderados das amostras. Nestes casos, os coeficientes de correlação r de Pearson mostram relações fortes, e positivas, sendo esperado, em uma taxa baixa ($0,025x$), aumento dos resultados com o aumento da densidade das amostras, para o intervalo e quantidade de dados testado. Ainda, o coeficiente de determinação mostra que 75% das variações presentes na relação entre os dois parâmetros são explicadas pelos dados.

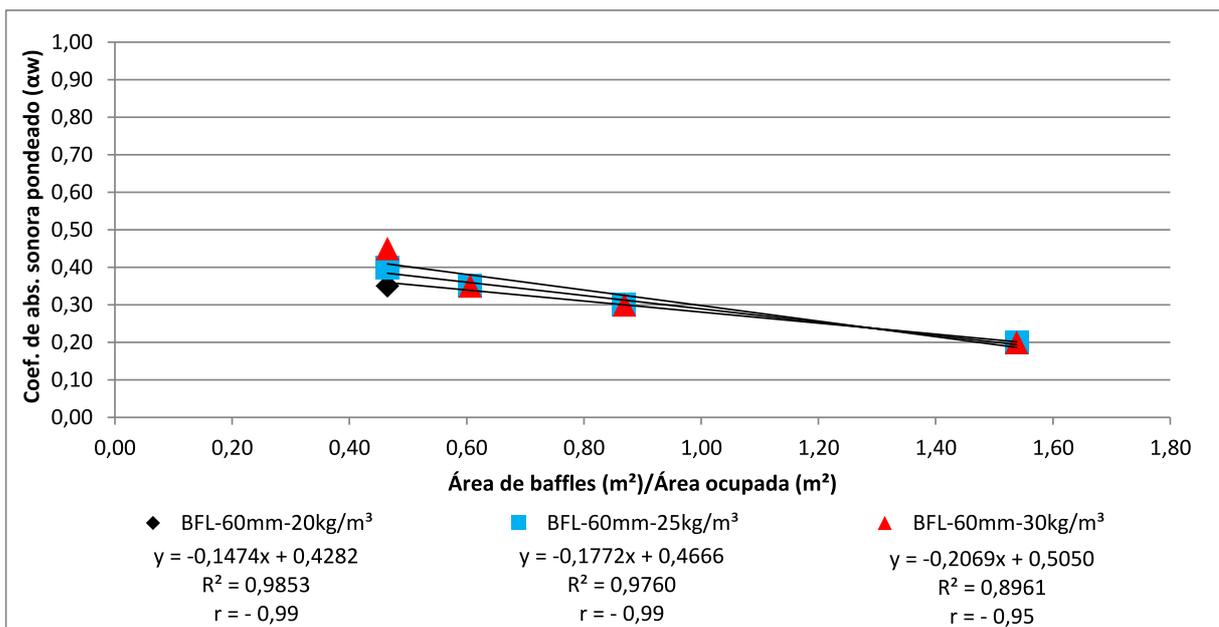
Comparando os quatro espaçamentos entre fileiras de *baffle* propostos, de modo geral, o aumento de 25 cm na distância entre fileiras de *baffle* entre cada uma das configurações de instalação resultou em aumentos crescentes nos coeficientes de absorção sonora, ocorrendo em menor magnitude apenas para a amostra com densidade de 30 kg/m^3 nas instalações J750 e J1000.

E, avaliando a influencia da densidade das mantas de lã de PET nos coeficientes de absorção sonora ponderados, para os espaçamentos de 25 e 50 cm, a densidade do material não promoveu mudança de desempenho, sendo que uma manta menos densa tem o mesmo resultado e economiza material. Neste caso, para os espaçamentos de 75 e 100 cm tal comportamento não ocorreu, porém, a manta intermediária pode substituir a mais densa para um mesmo resultado e menor quantidade de material utilizado.

Por fim, efetuada a avaliação dos coeficientes de absorção sonora por banda de um terço de oitava, de 100 a 5.000 Hz, e ponderados das amostras nas espessuras, densidades e distâncias entre fileiras de *baffle* propostos, a última análise compara os resultados ponderados com a quantidade de material utilizado. Neste caso, foi levada em conta a quantidade de *baffles*, em área, necessários para os ensaios em cada um dos modos de instalação e a área ocupada, no piso da câmara, para cada um dos arranjos (valores presentes na Tabela 6).

Desta forma, o Gráfico 35 e Gráfico 36, para os *baffles* com espessura de 60 e 65 mm, respectivamente, comparam os coeficientes de absorção sonora ponderados com a área de material necessária por metro quadrado de ocupação no teto, quando da sua real aplicação, e que varia em função do espaçamento adotado na sua instalação.

Gráfico 35 – Comparação entre os coeficientes de absorção sonora ponderados e a área de *baffles* por metro quadrado em amostras de 60 mm



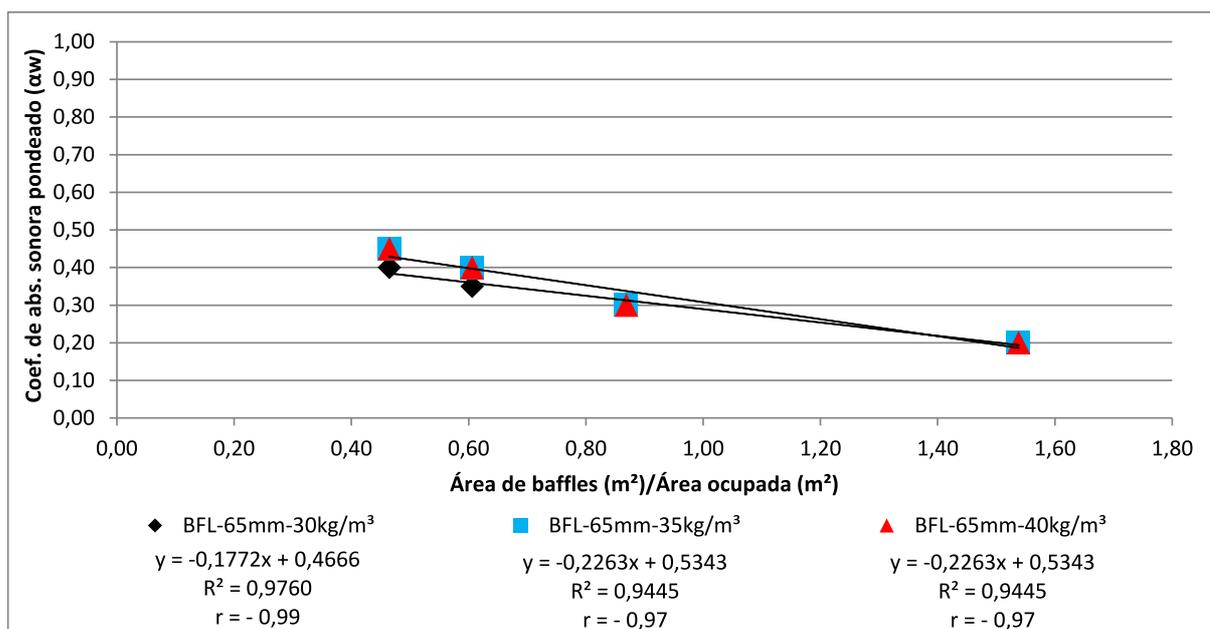
Fonte: Elaborado pelo Autor

Considerando a presente avaliação, para os *baffles* com mantas de 60 mm de espessura (Gráfico 35), a densidade das mantas obteve maior influência quanto menor a área de material por metro quadrado de superfície ocupada, sendo que quanto maior a densidade maior foi o coeficiente de absorção sonora ponderado.

Para as composições de densidade analisadas, os coeficientes de correlação r de Pearson indicaram uma relação forte entre os dados e decrescente, ou seja, é esperado que quanto maior a quantidade de *baffles* por unidade de área menor será a capacidade de absorção sonora (avaliada na forma do coeficiente de absorção sonora ponderado). Neste caso, os coeficientes de determinação também foram elevados, nos quais, no pior dos casos, 89,61% das variações presentes na comparação entre os dois parâmetros são explicadas pelos presentes dados.

Ainda, analisando o intervalo entre os valores da relação área de *baffle* por unidade de área ocupada ensaiados, quanto mais a quantidade de *baffles* por metro quadrado foi reduzida, até o limite de 0,46 m² de *baffle* por metro quadrado ocupado, menor foi a taxa de aumento no coeficiente de absorção sonora ponderado. Isto indica que possa haver um limite em que a redução da quantidade de material por metro quadrado atinja um valor máximo, estabilize e/ou inverta o comportamento verificado no intervalo e quantidade de dados propostos.

Gráfico 36 – Comparação entre os coeficientes de absorção sonora ponderados e a área de *baffles* por metro quadrado em amostras de 65 mm



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com os *baffles* compostos pelas mantas de 65 mm de espessura (Gráfico 36) o comportamento da capacidade de absorção sonora ocorreu da mesma forma que nas amostras de menor espessura.

A influência da densidade das mantas que formam os *baffles* foi maior quanto menor a quantidade de *baffles* por metro quadrado de área ocupada, sendo que, novamente, quanto maior a densidade das mantas maiores foram os coeficientes de absorção sonora ponderados para uma mesma condição.

Mais uma vez, os coeficientes de correlação r de Pearson demonstram uma relação forte para as três composições de densidade do material e com tendência negativa, ou seja, quanto maior a quantidade de *baffles* por unidade de área ocupada menor será o coeficiente de absorção sonora ponderado esperado.

Ainda, os coeficientes de determinação também foram elevados, sendo que os piores casos determinam que 94,45% das variações presentes entre os coeficientes de absorção sonora ponderados e a relação de área de *baffles* por área ocupada são explicadas pelos dados presentes na análise.

Por fim, considerando os intervalos de relação entre a área de *baffles* por unidade de área ocupada testados, se verifica que quanto menor a proporção desta relação, aproximando-se do limite de 0,46 m² desta avaliação, menor é a taxa de aumento do coeficiente de absorção sonora ponderado com a redução da quantidade de material para uma mesma área ocupada. Desta forma, os dados indicam que, provavelmente, o aumento nos resultados ocorre até determinado valor da presente relação, estabilizando e, possivelmente, invertendo o comportamento verificado no intervalo e quantidade de dados propostos.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo foi desenvolvido a partir da necessidade de caracterização de um material que tem se tornado atrativo para aplicação no mercado do tratamento acústico de salas, visto que une o apelo ambiental, pela reciclagem de uma matéria prima de origem não renovável, com capacidade de absorção sonora que desperta interesse, e que não possui uma ampla disponibilidade de dados quando comparado a materiais mais consolidados.

Assim, se pretendeu determinar o comportamento do espectro e capacidade de absorção sonora das mantas de lã de PET quando aplicadas na forma de painéis e *baffles*, com modos de instalação usuais quando da utilização no tratamento acústico de salas, em condições de uso de diferentes espessuras, densidade e distanciamento na sua montagem frente à superfície reflexiva.

Quando da caracterização das mantas utilizadas em forma de painéis, os coeficientes de absorção sonora, para todas as composições e modos de instalação, se comportaram conforme o esperado para materiais fibrosos, possuindo resultados modestos nas bandas de baixa frequência, elevados nas bandas de média com leve redução para as bandas de alta frequência.

Nesta avaliação, a densidade das mantas, para os intervalos e quantidade de dados analisados, se mostrou uma característica física com grande influência na capacidade de absorção sonora dos painéis, independente da forma de instalação considerada. Neste caso, na maioria das bandas de frequência, os maiores resultados foram verificados nas amostras compostas por lãs mais densas. Isto corrobora com o fato de que uma maior quantidade de fibras por unidade de área promove maior redução na energia das ondas sonoras para o intervalo de avaliação proposto. Porém, quando analisados os coeficientes de absorção sonora ponderados tal impacto não é tão evidente, visto que, para algumas configurações, a utilização de mantas menos densas promovem a economia de material e possuem mesmo resultado.

Ainda, o modo de instalação também se mostrou influente, sendo que a inclusão e o aumento da camada de ar entre as seções de painéis e a superfície reflexiva resultou em um aumento na capacidade de absorção sonora dos sistemas nas bandas de baixa frequência. Apesar disto, os ganhos nos coeficientes de absorção sonora não ocorreram nas bandas de frequência estimadas pelas

referências bibliográficas. Tal aumento na capacidade de absorção sonora nas bandas de baixa frequência, com a utilização de camada de ar, reduziu os resultados nas bandas de média e alta frequência.

E com a aplicação das mantas em forma de *baffle*, para todas as composições de espessura e densidade, os resultados verificados na caracterização dos sistemas apontaram para o crescimento dos coeficientes de absorção sonora com o aumento das bandas de frequência, ocorrendo em diferentes taxas entre as distâncias das fileiras dos arranjos. Tal espectro na absorção sonora frente à faixa de frequências analisada era previsto e conforme o esperado pela bibliografia.

Em relação à influência da densidade das mantas nos coeficientes de absorção sonora dos *baffles*, apesar de, principalmente nas condições de espaçamento mais próximo entre as seções de material, ser verificada a ocorrência de grande variação nos resultados em determinadas bandas e faixas de frequência, quanto maior a densidade das mantas de lã de PET maiores foram os resultados obtidos. Na avaliação dos coeficientes de absorção sonora ponderados este fator não se mostrou muito influente, principalmente nas configurações com menor espaçamento, evidenciando a possibilidade de produtos de menor densidade para um mesmo desempenho.

Considerando o impacto da distância do espaçamento entre as fileiras de *baffle*, esta se mostrou o fator que mais influenciou nos coeficientes de absorção sonora, conforme esperado pela bibliografia, em que maiores resultados eram esperados para espaçamentos maiores que a altura dos *baffles*. Neste caso, maiores espaçamentos permitem um maior ângulo de exposição da área de cada uma das seções de *baffle*, resultando em sistemas mais eficientes, visto que quanto maior o espaçamento, para o intervalo de 25 a 100 cm, maior foi a capacidade de absorção sonora e menor é a quantidade de material utilizado por metro quadrado.

Desta forma, o estudo corroborou com a verificação da aplicabilidade e do comportamento de sistemas de painéis e *baffles* constituídos de mantas de lã de PET para absorção sonora, verificando as diferenças que os tipos de instalação e composição do material causam na capacidade de absorção sonora. Neste caso, os dados presentes neste estudo são de grande valia para projetistas da área de acústica de salas e mercado de materiais de tratamento acústico, visto que prova a capacidade de desempenho dos sistemas e o impacto da sua forma de instalação.

REFERÊNCIAS

ADELMAN-LARSEN, N. W. **Rock and pop venues**: acoustic and architectural design. 1. ed. New York: Springer-Verlag, 2014.

AHNERT, W.; FEISTEL, S. Advanced measurements techniques: methods in architectural acoustics. *In*: XIANG, N. **Architectural acoustics handbook**. 1. ed. Plantation: J. Ross Publishing, 2017. p. 75-136.

ALTENBURG. **Ecofiber sound/sound color**. Blumenau: Altenburg Industria Textil Ltda, 2020. Disponível em: <http://www.ecofiber.ind.br/contato>. Acesso em: 24 mar. 2020.

ANSELMET, F.; MATTEI, P. **Acoustics, aeroacoustics and vibrations**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

ARENAS, J. P.; CROCKER, M. J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. **Sound & Vibration**, v. 44, p. 12-17, 2010. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Recent-Trends-in-Porous-Sound-Absorbing-Materials-Arenas-Crocker/7cd8786993e99efa77a2576d0750e4c09e800347>. Acesso em: 19 nov. 2019.

ARMSTRONG. **Optima**: baffles. Lancaster: Armstrong World Industries, 2020. Disponível em: <https://www.armstrongceilings.com/commercial/en-li/commercial-ceilings-walls/ceilings/optima-baffles-ceiling-family.html#bbbh=%7B%22selectedItem%22%3A%7B%22name%22%3A%22brows e%22%2C%22itemIndex%22%3Anull%7D%7D>. Acesso em: 20 maio 2020.

ASHBY, M. **Materials and the environment**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

ASHBY, M.; JOHNSON, K. **Materials and design**: the art and science of material selection in product design. 3. ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2014.

ASSELINÉAU, M. **Building acoustics**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET (ABIPET). **Censo da reciclagem do PET no Brasil**. 10. ed. São Paulo: ABIPET, 2016. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>. Acesso em: 19 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12984**: não-tecido: determinação da massa por unidade de área. Rio de Janeiro: 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13370**: não-tecido: terminologia. Rio de Janeiro: 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13908**: não-tecido: preparação de corpos-de-prova para ensaios laboratoriais. Rio de Janeiro: 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 139**: têxteis: atmosfera-padrão para condicionamento e ensaio. Rio de Janeiro: 2008.

ATTENBOROUGH, K.; VÉR, I. L. Sound-absorbing materials and sound absorbers. *In*: VÉR, I. L.; BERANEK, L. L. **Noise and vibration control engineering**: principles and applications. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. p. 215-278.

BARMAN, N. K.; BHATTACHARYA, S. S.; MANDOT, A. Mechanical properties of melt-spun monofilaments produced from virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) blends. **International Journal of Recent Scientific Research**. v. 6, n. 6, p. 4517-4525, 2015. Disponível em: <http://www.recentscientific.com/sites/default/files/2594.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2019.

BARRETT, P.; ZHANG, Y. **Optimal learning spaces**: design implications for primary schools. 1. ed. Salford: Design and Print Group-University of Salford, 2009.

BARRON, R. F. **Industrial noise control and acoustics**. 1. ed. New York: Marcel Dekker Inc, 2003.

BARRON, M. **Auditorium acoustics and architectural design**. 2. ed. New York: Spon Press, 2009.

BERANEK, L. **Concert halls and opera houses**: music, acoustics and architecture. 2. ed. New York: Springer-Verlag New York, 2004.

BERTOLINI, M. S.; MORAIS, C. A. G.; CHRISTOFORO, A. L.; BERTOLI, S. R.; SANTOS, W. N.; ROCCO, F. A. L. Acoustic absorption and thermal insulation of wood panels: influence of porosity. **BioResources**, v. 14, n. 2, p. 3746-3757, 2019. Disponível em: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_14_2_3746_Bertolini_Acoustic_Absorption_Thermal_Insulation. Acesso em: 29 mar. 2021.

BLAUERT, J.; XIANG, N. **Acoustics for engineers**: troy lectures. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

BOTTALICO, P. Speech adjustments for room acoustics and their effects on vocal effort. **Journal of voice**, v. 31, n. 3, p. 392.e1-392.e12, 2017. Disponível em: [https://www.jvoice.org/article/S0892-1997\(16\)30268-5/fulltext](https://www.jvoice.org/article/S0892-1997(16)30268-5/fulltext). Acesso em: 19 mai. 2020.

BRADLEY, J. S. Predictors of speech intelligibility in rooms. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 80, n. 3, p. 837-845, 1986a. Disponível em: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.393907?journalCode=jas>. Acesso em: 7 nov. 2019.

BRADLEY, J. S. Speech intelligibility studies in classrooms. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 80, n. 3, p. 846-854, 1986b. Disponível em: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.393908?journalCode=jas>. Acesso em: 8 nov. 2019.

BRADLEY, J. S.; SATO, H.; PICARD, M. On the importance of early reflections for speech in rooms. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 113, n. 6, p. 3233-3244, 2003. Disponível em: <https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1570439>. Acesso em: 8 nov. 2019.

BRADLEY, D. T.; MULLER-TRAPET, M.; ADELGREN, J.; VORLÄNDER, M. Comparison of hanging panels and boundary diffusers in a reverberation chamber. **Building Acoustics**, v. 21, n. 2, p. 145-152, 2014. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/1351-010X.21.2.145>. Acesso em: 30 out. 2019.

BRAVO, T.; MAURY, C. Sound attenuation and absorption by anisotropic fibrous materials: theoretical and experimental study. **Journal of Sound and Vibration**, v. 417, p. 165-181, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022460X1730809X?via%3Dihub>. Acesso em: 19 maio 2020.

CAO, L.; FU, Q.; SI, Y.; DING, B.; YU, J. Porous materials for sound absorption. **Composites Communications**, v. 10, p. 25-35, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452213918300433>. Acesso em: 19 nov. 2019.

ÇELIKEL, D. C.; BABAARSLAN, O. Effect of bicomponent fibers on sound absorption properties of multilayer nonwovens. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 12, n. 4, p. 15-25, 2017. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/155892501701200403>. Acesso em: 6 dez. 2019.

CONANT, D. A. Dramatic arts spaces. *In*: XIANG, N. **Architectural acoustics handbook**. 1. ed. Plantation: J. Ross Publishing, 2017. p. 457-488.

COPS, A. Absorption properties of baffles for noise control in industrial halls. **Applied Acoustics**, v. 18, p. 435-448, 1985. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0003682X85900234>. Acesso em: 15 abr. 2020.

COWAN, J. Building acoustics. *In*: ROSSING, T. D. **Springer handbook of acoustics**. 1. ed. New York: Springer Science+Bussines Media, 2007. p. 387-425.

COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application**. 3. ed. New York: Taylor & Francis, 2017.

DEL REY, R.; ALBA, J.; RAMIS, J.; SANCHÍS, V. J. New absorbent acoustic materials from plastic bottle remnants. **Materiales de Construcción**, v. 61, n. 304, p. 547-558, 2011. Disponível em:

<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/65>. Acesso em: 4 nov. 2019.

DUNNE, R.; DESAI, D.; SADIKU, R. A review of the factor that influence sound absorption and the available empirical models for fibrous materials. **Acoustics Australia**, v. 45, n. 2, p. 453-469, 2017. Disponível em: https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-doi-10_1007-S40857-017-0097-4. Acesso em: 14 abr. 2020.

ECOPHON. **Solo**: baffle. Hyllinge: Saint-Gobain Ecophon AB, 2020. Disponível em: <https://www.ecophon.com/en/products/Free-hanging-units-and-baffles/Solo/Solo--Baffle/>. Acesso em: 20 maio 2020.

EGAN, M. D. **Architectural acoustics**. 1. ed. Fort Lauderdale: J. Ross Publishing, 2007.

ERMANN, M. **Architectural acoustics illustrated**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

ESCOBAR, V. G.; MORILLAS, J. M. B. Analysis of intelligibility and reverberation time recommendations in educational rooms. **Applied Acoustics**, v. 96, p. 1-10, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X15000778>. Acesso em: 6 nov. 2019.

EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. **Master handbook of acoustics**. 6. ed. New York: McGraw Hill Education, 2015.

FUCHS, H. **Applied acoustics: Concepts, absorbers, and silencers for acoustical comfort and noise control**: alternative solutions, innovative tools, practical examples. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

GADE, A. C. Acoustics in halls for speech and music. *In*: ROSSING, T. D. **Springer handbook of acoustics**. 1. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2007. p. 301-350.

GELFAND, S. **An introduction to psychological and physiological acoustics**. 6. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

GEYER, B.; LORENZ, G.; KANDELBAUER, A. Recycling of poly(ethylene terephthalate): a review focusing on chemical methods. **eXPRESS Polymer Letters**, v. 10, n. 7, p. 559-586, 2016. Disponível em: <http://www.expresspolymlett.com/index.html?tartalom=content.php&year=2016&number=7&kodnumber=1>. Acesso em: 19 nov. 2019.

GHOTBI, M. R. R.; MARDI, H.; LANGARI, A. A. A.; MOHAMMADIAN, M.; KHANJANI, N. A review on the acoustical properties of natural and synthetic noise absorbers. **Open Access Library Journal**, v. 2, n. 8, p. 1-11, 2015. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=68525>. Acesso em: 19 nov. 2019.

GONZÁLEZ, M. A. S.; COLNAGHI, J.; OLIVEIRA, M. N. Acoustic analysis of the Padre Werner Unisinos auditorium. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 33, n. 3, p. 291-300, 2018. Disponível em: https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v33n3/en_0718-5073-ric-33-03-291.pdf. Acesso em: 29 mar. 2021.

HARVIE-CLARK, J.; LARRIEU, F.; DOBINSON, N.; WALLACE, D. Clarity & strength in non-diffuse fields: comparison with diffuse field models. *In: EuroNoise*, 2015. **Anais** [...] Maastricht: EAA-NAG-ABAV, 2015. p. 691-695.

HASSAN, N. N. M.; RUS, A. Z. M. Influences of thickness and fabric for sound absorption of biopolymer composite. **Applied Mechanics and Materials**, v. 393, p. 102-107, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.393.102>. Acesso em: 6 dez. 2019.

HOOVER, K. A. Music education spaces. *In: XIANG, N. Architectural acoustics handbook*. 1. ed. Plantation: J. Ross Publishing, 2017. p. 489-509.

HOPKINS C. **Sound insulation**. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2007.

HUANG, C.; LIN, J.; CHUANG, Y. Manufacturing process and property evaluation of sound-absorbing and thermal-insulation polyester fiber/polypropylene/thermoplastic polyurethane composite board. **Journal of Industrial Textiles**, v. 43, n. 4, p. 627-640, 2014. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1528083712471697>. Acesso em: 6 dez. 2019.

IANNACE, G. The acoustic characterization of green materials. **Building Acoustics**, v. 24, n. 2, p. 101-113, 2017. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1351010X17704624>. Acesso em: 12 mar. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 354**: acoustics: measurement of sound absorption in a reverberation room. Geneva: ISO, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 5084**: textil: determination of thickness of textiles and textile products. Geneva: ISO, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 11654**: acoustics: sound absorbers for use in buildings: rating of sound absorption. Geneva: ISO, 1997.

KAJIWARA, K.; OHTA, Y. Synthetic textile fibers: structure, characteristics and identification. *In: HOUCK, M. M. Identification of textile fibers*. 1. ed. New Dheli: Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 68-87.

KANG, J. **Acoustics of long spaces**: theory and design guidance. 1. ed. London: Thomas Telford Ltd, 2002.

- KARAYANNIDIS, G. P.; ACHILIAS, D. S. Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 292, p. 128-146, 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mame.200600341>. Acesso em: 5 dez. 2019.
- KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of acoustics**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- KLEINER, M.; TICHY, J. **Acoustics of small rooms**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- KLIPPEL FILHO, S.; LABRES, H. S.; PACHECO, F.; CHRIST, R.; PIRES, J. R.; HEISSLER, R. F.; OLIVEIRA, M. F. Uso da lã de PET para absorção sonora e o isolamento acústico. **Acústica e Vibrações**, v. 49, n. 12, p. 59-69, 2017. Disponível em: <http://acustica.org.br/revistas/>. Acesso em: 13 nov. 2019.
- KNAUF-AMF. **AMF Thermatex**: product catalogue. Grafenau: Knauf AMF GmbH & Co KG, 2019. Disponível em: https://www.knaufamf.com/en/product-range/thermatex-mineral/index.php#showtab-tab1538274_5. Acesso em: 24 mar. 2020.
- KINETICS. **Kinetics KB803**: sound baffles. Dublin: Kinetics Noise Control Inc., 2020. Disponível em: <https://kineticsnoise.com/kb803/sound-baffle.html>. Acesso em: 20 maio 2020.
- KOIZUMI, T.; TSUJIUCHI, N.; ADACHI, A. The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. *In*: BREBBIA, C. A.; DE WILDE, W. P. **High Performance Structures and Composites**. 1. ed. Southampton: WIT Press, 2002.
- KONKANI, A.; OAKLEY, B. Noise in hospital intensive care units: a critical review of a critic topic. **Journal of Critical Care**, v. 27, p. 522.e1-522.e9, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22033048/>. Acesso em: 19 maio 2020.
- KOSUGE, K.; TAKAYASU, A.; HORI, T. Recyclable flame retardant nonwoven for sound absorption:RUBA. **Journal of Materials Science**, v. 40, p. 5399-5405, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-005-4338-9>. Acesso em: 6 dez. 2019.
- KÜCÜK, M.; KORKMAZ, Y. Sound absorption properties of bilayered nonwoven composites. **Fibers and Polymers**, v. 16, n. 4, p. 941-948, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12221-015-0941-9>. Acesso em: 5 dez. 2019.
- KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 6. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- LAM, A.; HODGSON, M.; PRODI, N.; VISENTIN, C. Effects of classroom acoustics on speech intelligibility and response time: a comparison between native and non-native listeners. **Building Acoustics**, v. 25, n. 1, p. 35-42, 2018. Disponível em:

<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1351010X18758477>. Acesso em: 14 nov. 2019.

LARSON, R.; FARBER, B. **Elementary statistics**: picturing the world. 6. ed. Boston: Pearson Education, 2015.

LECHNER, N. **Plumbing, electricity, acoustics**: sustainable design methods for architecture. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

LEE, Y. E.; JOO, C. W. Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers. **AUTEX Research Journal**, v. 3, n. 2, p. 78-84, 2003.

Disponível em:

<https://pdfs.semanticscholar.org/5fec/61090a6ba5edcb7e4fadae39a40e9e14cded.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2019.

LEPOITTEVIN, B.; ROGER, P. Poly(ethylene terephthalate). *In*: THOMAS, S; VISAKH, P. M. **Hanbook of engineering and specialty thermoplastics**: volume 3: polyethers and polyesters. 1. ed. Salem: Scrivener Publishing LLC, 2011. p. 97-126.

LIM, Z. Y.; PUTRA, A.; NOR, M. J. M.; YAAKOB, M. Y. Sound absorption performance of natural kenaf fibres. **Applied Acoustics**, v. 130, p. 107-114, 2018.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X17305583>. Acesso em: 24 out. 2019.

LONG, M. **Architectural acoustics**. 2. ed. Waltham: Academic Press, 2014.

LOU, C.; LIN, J.; SU, K. Recycling polyester and polypropylene nonwoven selvages to produce functional sound absorption composites. **Textile Research Journal**, v. 75, n. 5, p. 390-394, 2005. Disponível em:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Recycling-Polyester-and-Polypropylene-Nonwoven-to-Lou-Lin/b718340d2ef8421b0e0352736cd0311e4f5fe640>. Acesso em: 6 dez. 2019.

MADBOULY, A. I.; NOAMAN, A. Y.; RAGAB, A. H. M.; KHEDRA, A. M.; FAYOUMI, A. G. Assessment model of classroom acoustics criteria for enhancing speech intelligibility and learning quality. **Applied Acoustics**, v. 114, p. 147-158, 2016.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X16302122>. Acesso em: 18 nov. 2019.

MAMTAZ, H.; HOSSEINI, M. F.; AL-ATABI, M.; NARAYANA, S. N. Acoustic absorption of natural fiber composites. **Journal of Engineering**, v. 2016, p. 11, 2016.

Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/je/2016/5836107/cta/>. Acesso em: 24 out. 2019.

MAO, N.; RUSSELL, S. J.; POURDEYHIMI, B. Characterization, testing and modelling of nonwoven fabrics. *In*: RUSSELL, S. J. **Hanbook of Nonwovens**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007. p. 401-514.

MASON, R. L.; GUNST, R. F.; HESS, J. L. **Statistical design and analysis of experiments**: with applications to engineering and Science. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

MCKAY, R. L. Music performance spaces. *In*: XIANG, N. **Architectural acoustics handbook**. 1. ed. Plantation: J. Ross Publishing, 2017. p. 403-456.

MEYER, J. **Acoustics and the performance of music**: manual for acousticians, audio engineers, musicians, architects and musical instruments makers. 5. ed. New York: Springer, 2009.

MOMMERTZ, E. **Acoustics and sound insulation**: principles, planning, examples. Munich: Architektur-Dokumentation GmbH, 2008.

MÖSER, M. **Engineering acoustics**: an introduction to noise control. 2. ed. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

MWANZA, B. G.; MBOHWA, C. Drivers to sustainable plastic solid waste recycling: a review. **Procedia Manufacturing**, v. 8, p. 649-656, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917300896>. Acesso em: 19 nov. 2019.

NEWELL, P. **Recording studio design**. 3. ed. Boca Raton: Elsevier Ltd, 2012.

NOONE, A. Collected PET bottles. *In*: International Polyester Recycling Forum, 13., 2008, Bad Oeynhausen. **Anais** [...]Bad Oeynhausen: International Polyester Recycling Forum, 2008.

OLIVA, D.; HONGISTO, V. Sound absorption of porous materials: accuracy of prediction methods. **Applied Acoustics**, v. 74, p. 1473-1479, 2013. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.06.004>. Acesso em: 21 mar. 2020.

OTHMANI, C. TAKTAK, M.; ZAIN, A.; HANTATI, T.; DAUCHEZ, N.; ELNADY, T.; FAKHFAKH, T.; HADDAR, M. Acoustic characterization of a porous absorber based on recycled sugarcane wastes. **Applied Acoustics**, v. 120, p. 90-97, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X17300385>. Acesso em: 24 out. 2019.

PATNAIK, A.; MVUBU, M.; MUNIYASAMY, S.; BOTHA, A.; ANANDJIWALA, R. D. Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies. **Energy and Buildings**, v. 92, p. 161-169, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778815000821>. Acesso em: 6 dez. 2019.

PENG, J.; ZHANG, H.; WANG, D. Measurement and analysis of teaching and background noise level in classrooms of Chinese elementary schools. **Applied Acoustics**, v. 131, p. 1-4, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X17305637>. Acesso em: 14 nov. 2019.

PLANALTO. **Catálogo**. Encantado: Planalto Industria Textil Ltda, 2019. Disponível em: <http://www.planaltotextil.com.br/>. Acesso em: 24 mar. 2020.

POHL, J. **Building science**: concepts and application. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

POURMOHAMMADI, A. Thermal bonding. *In*: RUSSEL, S. J. **Handbook of nonwovens**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007. p. 298-329.

POURMOHAMMADI, A. Nonwoven materials and joining techniques. *In*: JONES, I.; STYLIOS, G. K. **Joining textiles**: principles and applications. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. p. 565-581.

QIU, X. Principles of sound absorbers. *In*: PADHYE, R.; NAYAK, R. **Acoustic textiles**. 1. ed. Singapore: Springer Science+Bussines Media, 2016. p. 43-72.

RABBI, A.; BAHRAMBEYGI, H.; NASOURI, K.; SHOUSHTARI, A. M.; BABAEI, M. R. Manufacturing of PAN or PU nanofiber layers/PET nonwoven composite as highly effective sound absorbers. **Advances in Polymer Technology**, v. 33, n. 4, p. 1-8, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adv.21425>. Acesso em: 6 dez. 2019.

RABELO, A. T. V.; SANTOS, J. N.; OLIVEIRA, R. C.; MAGALHÃES, M. C. Effect of classroom acoustics on the speech intelligibility of students. **CoDAS**, v. 26, n. 5, p. 360-366, 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2317-17822014000500360. Acesso em: 4 nov. 2019.

RATNER, B. The correlation coefficient: its values ranger between +1/-1, or do they?. **Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing**, v. 17, n. 2, p. 139-142, 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1057/jt.2009.5>. Acesso em: 27 abr. 2020.

REINTEN, J.; BRAAT-EGGEN, P. E.; HORNIKX, M.; KORT, H. S. M.; KOHLRAUSCH, A. The indoor sound environment and human task performance: a literature review on the role of room acoustics. **Building and Environment**, v. 123, p. 315-332, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.005>. Acesso em: 21 mar. 2020.

RUBINO, C.; ARACIL, M. B.; GISBERT-PAYÁ, J.; LIUZZI, S.; STEFANIZZI, P.; CANTÓ, M. Z.; MARTELLOTTA, F. Composite eco-friendly sound absorbing materials made of recycled textile waste and biopolymers. **Materials**, v. 12, n. 23, p. 4020, 2019. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6926769/>. Acesso em: 19 maio 2020.

RUSSELL, S. J.; SMITH, P. A. Technical fabric structures: 3: nonwoven fabrics. *In*: HORROCKS, A. R.; ANAND, S. C. **Hanbook of Technical Textiles**. 2. ed. Cambridge: Elsevier Ltd, 2016. p. 163-188.

SAGARTZAZU, X.; HERVELLA-NIETO, L.; PAGALDAY, J. M. Review in sound absorbing materials. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 15, p. 311-342, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-008-9022-1>. Acesso em: 19 maio 2020.

SAINT-GOBAIN. **Ecophon akusto one**. Ramsdell: Saint-Gobain, 2019a. Disponível em: <https://www.ecophon.com/uk/products/Vertical-applications/Akusto/Akusto--One-SQ/>. Acesso em: 24 mar. 2020.

SAINT-GOBAIN. **Ecophon solo baffle**. Ramsdell: Saint-Gobain, 2019b. Disponível em: <https://www.ecophon.com/en/products/Free-hanging-units-and-baffles/Solo/Solo-Baffle/>. Acesso em: 24 mar. 2020.

SAINT-GOBAIN. **Forros acústicos**. São Paulo: Saint-Gobain, 2019c. Disponível em: <https://www.isover.com.br/construcao-civil/forros-para-teto>. Acesso em: 29 out. 2019.

SAINT-GOBAIN. **Painéis acústicos**. São Paulo: Saint-Gobain, 2019d. Disponível em: <https://www.isover.com.br/industria/paineis-acusticos>. Acesso em: 29 out. 2019.

SAINT-GOBAIN. **Wallfelt 4+**. São Paulo: Saint-Gobain, 2019e. Disponível em: <https://www.isover.com.br/construcao-civil/la-de-vidro-para-drywall/feltro-wallfelt>. Acesso em: 6 dez. 2019.

SCHEIRS, J. **Polymer recycling: science, technology, and applications**. Chichester: John Wiley & Sons, 1998.

SEDDEQ, H. S. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 3, n. 4, p. 4610-4617, 2009. Disponível em: <http://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2009/4610-4617.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2019.

SEDDEQ, H. S.; ALY, N. M.; MARWA, A.; ELSHAKANKERY, M. H. Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials, **Journal of Industrial Textiles**, v. 43, n. 1, p. 56-73, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1528083712446956>. Acesso em: 21 mar. 2020.

SHIELD, B.; CONETTA, R.; DOCKRELL, J.; CONNOLLY, D.; COX, T.; MYDLARZ, C. A survey of acoustic conditions and noise levels in secondary school classrooms in England. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 137, n. 1, p. 177-188, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1121/1.4904528>. Acesso em: 6 dez. 2019.

SILVA, C. O.; SANTOS, G. M.; SILVA, L. N. A degradação ambiental causada pelo descarte inadequado das embalagens plásticas: estudo de caso. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 13, n. 13, p. 2683-2689, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/download/8248/pdf>. Acesso em: 6 dez. 2019.

SINGH, V. K.; MUKHOPADHYAY, S. Manufacturing methods for acoustic textiles. *In: PADHYE, R.; NAYAK, R. **Acoustic textiles***. 1. ed. Singapore: Springer Science+Business Media, 2016. p. 93-113.

SMALDINO, J.; KREISMAN, B.; JOHN, A.; BONDURANT, L. Room acoustics and auditory rehabilitation technology. *In: KATZ, J.; CHASIN, M.; ENGLISH, K.; HOOD, L. J.; TILLERY, K. L. **Handbook of Clinical Audiology***. 7. ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health, 2015. p. 675-702.

SUN, F.; BANKS-LEE, P.; PENG, H. Sound absorption in an anisotropic periodically layered fluid-saturated porous medium. **Applied Acoustics**, v. 39, n. 1-2, p. 65-76, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(93\)90030-A](https://doi.org/10.1016/0003-682X(93)90030-A). Acesso em: 8 jun. 2019.

SUVARI, F.; ULCAY, Y.; POUDEYHIMI, B. Sound absorption analysis of thermally bonded high-loft nonwovens. **Textile Research Journal**, v. 86, n. 8, p. 837-847, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0040517515590412>. Acesso em: 27 jun. 2019.

SZYMANSKI, J. Acoustical treatment for indoor areas. *In: BALLOU, G. M. **Handbook for sound engineers***. 4. ed. Oxford: Elsevier Inc, 2008. p. 95-124.

THOMAS, S; VISAKH, P. M. Engineering and specialty thermoplastics: polyethers and polyesters: state-of-the-art, new challenges and opportunities. *In: THOMAS, S; VISAKH, P. M. **Handbook of engineering and specialty thermoplastics: volume 3: polyethers and polyesters***. 1. ed. Salem: Scrivener Publishing LLC, 2011. p. 1-14.

THOMAZELLI, R.; BERTOLI, S. An experimental study on the optimization of the production and efficiency of tunable Helmholtz absorbers for the modal control of small rooms. **Building Acoustics**, v. 26, n. 2, p. 69-91, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1351010X19829870#articleCitationDownloadContainer>. Acesso em: 29 mar. 2021.

TOOLE, F. E. **Sound reproduction: loudspeakers and rooms**. 1. ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2008.

TRISOFT. **Soluções acústicas arquitetônicas**. Itapevi: Trisoft Textil Ltda, 2019. Disponível em: <https://www.trisoft.com.br/portfolio/baffles-trisoft/>. Acesso em: 24 mar. 2020.

TURNER, J. D.; PRETLOVE, A. J. **Acoustics for engineers**. 1. ed. London: MacMillan Education Ltd, 1991.

VIGRAN, T. E. **Building acoustics**. 1. ed. New York: Taylor & Francis, 2008.

WHITLOCK, J. A. T.; DODD, G. Speech intelligibility in classrooms: specific acoustical needs for primary school children. **Building Acoustics**, v. 15, n. 1, p. 35-47, 2008. Disponível em:

<https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/135101008784050223?icid=int.sj-abstract.similar-articles.2>. Acesso em: 6 nov. 2019.

WILDE, P. **Building performance analysis**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.

WYPYCH, G. **Hanbook of polymers**. 2. ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2016.

YANG, S.; YU, W. Air permeability and acoustic behavior of nonwovens. **Journal of Fiber Bioengineering and Informatics**, v. 3, n. 4, p. 203-207, 2011. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/0579/c1872760b80e5d7502db0ee05a0cc8274708.pdf>. Acesso em: 6 dez. 2019.

YHAYA, M. F.; TAJARUDIN, H. A.; AHMAD, M. I. **Renewable and sustainable materials in green technology**. 1. ed. Cham: Springer International Publishing AG, 2018.

YILMAZ, N. D.; BANKS-LEE, P.; POWELL, N. B.; MICHELSEN, S. Effects of porosity, fiber size, and layering sequence on sound absorption performance of needle-punched nonwovens. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 121, n. 5, p. 3056-3069, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.33312>. Acesso em: 6 nov. 2019.

APÊNDICE A – RESUMO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS MANTAS

Tabela 8 – Resultados de massa por unidade de área e densidade aparente das amostras

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	T (°C)	UR (%)	P (psi)	Data
60mm- 20kg/m ³	Área (cm ²)	650,25	637,50	622,38	663,00	663,00	637,50	650,00	625,00	657,92	652,60	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Massa (g)	85,80	85,60	81,60	84,10	87,23	77,40	85,25	80,10	87,10	85,10	-				
	G (kg/m ²)	1,32	1,34	1,31	1,27	1,32	1,21	1,31	1,28	1,32	1,30	1,30				
	ρ (kg/m ³)	21,62	21,13	22,94	21,10	21,84	20,67	22,71	20,93	22,13	21,78	21,69				
60mm- 25kg/m ³	Área (cm ²)	650,25	605,12	670,56	650,25	625,00	640,00	632,50	637,50	645,15	632,50	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Massa (g)	89,90	90,30	112,20	95,80	106,10	98,20	91,50	94,30	91,40	100,80	-				
	G (kg/m ²)	1,38	1,49	1,67	1,47	1,70	1,53	1,45	1,48	1,42	1,59	1,52				
	ρ (kg/m ³)	23,10	24,15	27,07	24,84	28,57	24,80	24,20	23,96	23,10	26,36	25,02				
60mm- 30kg/m ³	Área (cm ²)	620,00	630,00	624,75	627,50	629,97	632,50	635,04	634,88	614,95	632,50	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Massa (g)	97,70	101,90	115,60	96,70	118,80	114,20	100,50	129,40	107,90	109,50	-				
	G (kg/m ²)	1,58	1,62	1,85	1,54	1,89	1,81	1,58	2,04	1,75	1,73	1,74				
	ρ (kg/m ³)	25,58	26,47	29,28	26,09	31,87	29,17	26,13	32,95	29,39	28,11	28,50				
65mm- 30kg/m ³	Área (cm ²)	592,90	663,00	612,50	646,25	650,25	624,75	607,50	612,00	650,00	607,50	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Massa (g)	115,50	121,86	115,20	122,80	118,60	117,90	117,89	119,10	118,27	139,10	-				
	G (kg/m ²)	1,95	1,84	1,88	1,90	1,82	1,89	1,94	1,95	1,82	2,29	1,93				
	ρ (kg/m ³)	30,29	29,03	28,41	30,31	28,13	28,68	30,56	30,45	27,06	34,86	29,78				

(continuação)

	Área (cm ²)	650,00	650,00	629,85	580,77	651,70	627,50	612,50	609,60	660,40	625,00	-					
65mm- 35kg/m ³	Massa (g)	130,70	139,70	129,60	122,00	131,50	141,50	132,90	150,50	164,30	162,30	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21	
	G (kg/m ²)	2,01	2,15	2,06	2,10	2,02	2,25	2,17	2,47	2,49	2,60	2,23					
	ρ (kg/m ³)	31,66	33,51	31,86	31,59	31,47	35,02	33,76	37,19	39,12	40,98	34,62					
	Área (cm ²)	650,00	600,00	615,00	620,00	666,90	625,00	637,50	644,80	580,80	637,50	-					
65mm- 40kg/m ³	Massa (g)	165,60	140,60	158,40	156,60	166,00	159,40	157,00	149,70	152,60	170,60	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21	
	G (kg/m ²)	2,55	2,34	2,58	2,53	2,49	2,55	2,46	2,32	2,63	2,68	2,51					
	ρ (kg/m ³)	40,45	37,54	40,34	39,16	38,29	40,11	37,81	35,96	40,16	41,03	39,08					

Tabela 9 – Resultados de espessura das amostras

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	T (°C)	UR (%)	P (psi)	Data
60mm- 20kg/m ³	Chapa+Manta (mm)	62,30	64,82	58,44	61,39	61,53	60,03	59,03	62,51	61,09	61,16	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Chapa (mm)	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	-				
	Manta (mm)	61,02	63,54	57,16	60,11	60,25	58,75	57,75	61,23	59,81	59,88	59,95				
60mm- 25kg/m ³	Chapa+Manta (mm)	61,13	63,07	63,08	60,58	60,70	63,15	61,07	63,01	62,62	61,74	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Chapa (mm)	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	-				
	Manta (mm)	59,85	61,79	61,80	59,30	59,42	61,87	59,79	61,73	61,34	60,46	60,74				
60mm- 30kg/m ³	Chapa+Manta (mm)	62,89	62,38	64,47	60,35	60,46	63,18	61,85	63,14	60,99	62,87	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Chapa (mm)	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	-				
	Manta (mm)	61,61	61,10	63,19	59,07	59,18	61,90	60,57	61,86	59,71	61,59	60,98				
65mm- 30kg/m ³	Chapa+Manta (mm)	65,59	64,60	67,49	63,97	66,12	67,08	64,78	65,20	68,51	66,97	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Chapa (mm)	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	-				
	Manta (mm)	64,31	63,32	66,21	62,69	64,84	65,80	63,50	63,92	67,23	65,69	64,75				
65mm- 35kg/m ³	Chapa+Manta (mm)	64,79	65,41	65,86	67,78	65,40	65,67	65,56	67,66	64,87	64,65	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Chapa (mm)	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	-				
	Manta (mm)	63,51	64,13	64,58	66,50	64,12	64,39	64,28	66,38	63,59	63,37	64,49				
65mm- 40kg/m ³	Chapa+Manta (mm)	64,27	63,70	65,13	65,78	66,29	64,87	66,41	65,85	66,70	66,51	-	23,6	53,4	14,6	28/01/21
	Chapa (mm)	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	-				
	Manta (mm)	62,99	62,42	63,85	64,50	65,01	63,59	65,13	64,57	65,42	65,23	64,27				

Tabela 10 – Resultados de porosidade das amostras

Amostra	Porosidade	
60mm- 20kg/m ³	ρ_m (g/cm ³)	0,02
	ρ_f (g/cm ³)	1,38
	ε (%)	98%
60mm- 25kg/m ³	ρ_m (g/cm ³)	0,03
	ρ_f (g/cm ³)	1,38
	ε (%)	98%
60mm- 30kg/m ³	ρ_m (g/cm ³)	0,03
	ρ_f (g/cm ³)	1,38
	ε (%)	98%
65mm- 30kg/m ³	ρ_m (g/cm ³)	0,03
	ρ_f (g/cm ³)	1,38
	ε (%)	98%
65mm- 35kg/m ³	ρ_m (g/cm ³)	0,03
	ρ_f (g/cm ³)	1,38
	ε (%)	97%
65mm- 40kg/m ³	ρ_m (g/cm ³)	0,04
	ρ_f (g/cm ³)	1,38
	ε (%)	97%

APÊNDICE B – RESUMO DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO SONORA

Tabela 11 – Resultados de coeficiente de absorção sonora dos painéis

Amostra	Item	Frequência [Hz]																		T (°C)	UR (%)	P (psi)	Data
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1.0k	1.25k	1.6k	2.0k	2.5k	3.15k	4.0k	5.0k				
PNL-60mm-20kg/m ³ -TA	TR V	10,75	9,24	8,00	7,94	8,02	8,88	8,56	8,00	7,57	7,26	6,72	6,18	5,88	5,28	4,78	4,22	3,56	3,04	25,4	71,4	14,59	30/11/20
	TR A	6,30	5,11	3,53	3,30	3,04	2,92	2,75	2,43	2,52	2,30	2,27	2,23	2,30	2,28	2,25	2,18	2,09	1,88	24,9	72,2	14,59	30/11/20
	αs	0,19	0,25	0,45	0,50	0,58	0,65	0,70	0,82	0,75	0,85	0,83	0,82	0,76	0,71	0,67	0,63	0,57	0,58			-	
PNL-60mm-20kg/m ³ -TE50	TR V	10,80	8,84	7,69	7,69	7,59	8,38	8,06	7,57	6,96	6,77	6,35	5,99	5,57	5,04	4,52	3,98	3,39	2,84	25,2	68,3	14,7	13/11/20
	TR A	6,24	5,08	3,60	3,23	2,81	2,71	2,56	2,34	2,35	2,43	2,39	2,39	2,43	2,39	2,24	2,12	2,02	1,84	25,2	68,3	14,7	13/11/20
	αs	0,19	0,24	0,42	0,51	0,64	0,71	0,76	0,84	0,80	0,75	0,74	0,72	0,66	0,62	0,64	0,62	0,57	0,54			-	
PNL-60mm-20kg/m ³ -TE100	TR V	9,96	8,48	7,42	7,32	7,57	7,51	7,20	6,84	6,91	6,89	6,38	5,98	5,60	4,88	4,28	3,77	3,19	2,62	21,5	64,4	14,6	03/11/20
	TR A	5,56	4,73	3,55	2,88	2,93	2,71	2,44	2,44	2,59	2,63	2,80	2,70	2,51	2,39	2,34	2,20	2,01	1,69	20,6	51,8	14,7	04/11/20
	αs	0,23	0,27	0,42	0,60	0,60	0,68	0,78	0,76	0,70	0,68	0,58	0,59	0,63	0,61	0,54	0,51	0,46	0,48			-	
PNL-60mm-25kg/m ³ -TA	TR V	10,75	9,24	8,00	7,94	8,02	8,88	8,56	8,00	7,57	7,26	6,72	6,18	5,88	5,28	4,78	4,22	3,56	3,04	25,4	71,4	14,6	30/11/20
	TR A	6,43	5,07	3,56	3,29	2,90	2,79	2,57	2,34	2,39	2,23	2,27	2,21	2,30	2,24	2,26	2,09	2,02	1,86	24,9	72,2	14,6	30/11/20
	αs	0,18	0,25	0,44	0,51	0,63	0,70	0,78	0,86	0,82	0,88	0,83	0,83	0,76	0,73	0,67	0,69	0,61	0,60			-	
PNL-60mm-25kg/m ³ -TE50	TR V	10,80	8,84	7,69	7,69	7,59	8,38	8,06	7,57	6,96	6,77	6,35	5,99	5,57	5,04	4,52	3,98	3,39	2,84	25,2	68,3	14,7	13/11/20
	TR A	6,07	4,82	3,66	3,00	2,61	2,62	2,32	2,22	2,27	2,39	2,35	2,36	2,39	2,28	2,16	2,07	1,98	1,77	25,2	68,3	14,7	13/11/20
	αs	0,21	0,27	0,41	0,58	0,72	0,75	0,87	0,91	0,84	0,77	0,76	0,73	0,68	0,68	0,68	0,66	0,60	0,60			-	
PNL-60mm-25kg/m ³ -TE100	TR V	9,96	8,48	7,42	7,32	7,57	7,51	7,20	6,84	6,91	6,89	6,38	5,98	5,60	4,88	4,28	3,77	3,19	2,62	21,5	64,4	14,6	04/11/20
	TR A	5,43	4,62	3,24	2,59	2,59	2,46	2,33	2,41	2,53	2,59	2,62	2,55	2,43	2,37	2,28	2,10	1,97	1,64	20,6	51,8	14,7	04/11/20
	αs	0,24	0,28	0,50	0,71	0,73	0,79	0,83	0,77	0,72	0,70	0,65	0,65	0,67	0,62	0,57	0,56	0,49	0,54			-	

(continuação)

PNL- 60mm- 30kg/m ³ - TA	TR V	10,75	9,24	8,00	7,94	8,02	8,88	8,56	8,00	7,57	7,26	6,72	6,18	5,88	5,28	4,78	4,22	3,56	3,04	25,4	71,4	14,6	30/11/20
	TR A	6,44	5,20	3,56	3,08	2,74	2,72	2,51	2,28	2,34	2,31	2,27	2,26	2,30	2,32	2,25	2,16	2,09	1,88	24,9	72,2	14,6	30/11/20
	as	0,18	0,24	0,44	0,56	0,69	0,73	0,80	0,90	0,84	0,84	0,83	0,80	0,76	0,69	0,67	0,64	0,56	0,58			-	
PNL- 60mm- 30kg/m ³ - TE50	TR V	10,80	8,84	7,69	7,69	7,59	8,38	8,06	7,57	6,96	6,77	6,35	5,99	5,57	5,04	4,52	3,98	3,39	2,84	25,2	68,3	14,7	13/11/20
	TR A	6,10	4,74	3,79	2,85	2,49	2,50	2,42	2,14	2,26	2,30	2,32	2,36	2,37	2,27	2,17	2,04	1,96	1,78	25,2	68,3	14,7	13/11/20
	as	0,20	0,28	0,38	0,63	0,77	0,80	0,82	0,96	0,85	0,81	0,78	0,73	0,69	0,69	0,68	0,68	0,62	0,60			-	
PNL- 60mm- 30kg/m ³ - TE100	TR V	9,96	8,48	7,42	7,32	7,57	7,51	7,20	6,84	6,91	6,89	6,38	5,98	5,60	4,88	4,28	3,77	3,19	2,62	21,5	64,4	14,6	03/11/20
	TR A	5,41	4,59	3,50	2,65	2,60	2,51	2,31	2,34	2,48	2,63	2,54	2,51	2,48	2,38	2,28	2,13	1,93	1,63	20,6	51,8	14,7	04/11/20
	as	0,24	0,29	0,43	0,69	0,72	0,76	0,84	0,81	0,75	0,68	0,69	0,67	0,65	0,61	0,57	0,54	0,52	0,55			-	
PNL- 65mm- 30kg/m ³ - TA	TR V	11,05	9,35	7,69	7,91	7,82	8,69	8,69	8,04	7,63	7,34	6,80	6,30	5,96	5,39	4,87	4,21	3,55	3,01	24,5	72,4	14,6	27/11/20
	TR A	6,26	5,08	3,69	3,12	2,90	2,83	2,54	2,34	2,42	2,31	2,32	2,21	2,25	2,33	2,28	2,16	2,06	1,88	24,5	72,4	14,6	27/11/20
	as	0,20	0,26	0,40	0,55	0,62	0,68	0,79	0,86	0,80	0,85	0,81	0,84	0,79	0,69	0,67	0,64	0,58	0,57			-	
PNL- 65mm- 30kg/m ³ - TE50	TR V	10,80	8,84	7,69	7,69	7,59	8,38	8,06	7,57	6,96	6,77	6,35	5,99	5,57	5,04	4,52	3,98	3,39	2,84	25,2	68,3	14,7	13/11/20
	TR A	5,95	4,79	3,60	2,92	2,62	2,57	2,36	2,22	2,33	2,41	2,40	2,41	2,43	2,36	2,31	2,20	2,12	1,80	22,2	63,7	14,6	18/11/20
	as	0,22	0,27	0,42	0,61	0,71	0,77	0,86	0,91	0,83	0,78	0,76	0,73	0,68	0,66	0,62	0,58	0,49	0,53			-	
PNL- 65mm- 30kg/m ³ - TE100	TR V	9,96	8,48	7,42	7,32	7,57	7,51	7,20	6,84	6,91	6,89	6,38	5,98	5,60	4,88	4,28	3,77	3,19	2,62	21,5	64,4	14,6	03/11/20
	TR A	5,32	4,47	3,37	2,68	2,73	2,51	2,38	2,23	2,48	2,50	2,54	2,47	2,42	2,32	2,26	2,20	2,07	1,80	21,5	64,5	14,6	03/11/20
	as	0,25	0,30	0,46	0,68	0,67	0,76	0,80	0,87	0,74	0,73	0,68	0,68	0,67	0,65	0,60	0,54	0,48	0,50			-	
PNL- 65mm- 35kg/m ³ - TA	TR V	11,05	9,35	7,69	7,91	7,82	8,69	8,69	8,04	7,63	7,34	6,80	6,30	5,96	5,39	4,87	4,21	3,55	3,01	24,5	72,4	14,6	27/11/20
	TR A	6,60	5,44	3,97	3,35	3,02	2,74	2,47	2,28	2,38	2,27	2,25	2,22	2,30	2,25	2,20	2,12	2,04	1,86	24,5	72,4	14,6	27/11/20
	as	0,17	0,22	0,35	0,49	0,58	0,71	0,82	0,89	0,83	0,87	0,85	0,83	0,76	0,73	0,71	0,67	0,59	0,58			-	

(continuação)

PNL- 65mm- 35kg/m ³ - TE50	TR V	10,80	8,84	7,69	7,69	7,59	8,38	8,06	7,57	6,96	6,77	6,35	5,99	5,57	5,04	4,52	3,98	3,39	2,84	25,2	68,3	14,7	13/11/20
	TR A	6,41	5,04	3,79	2,99	2,65	2,49	2,24	2,23	2,39	2,29	2,37	2,37	2,39	2,36	2,28	2,16	2,09	1,81	22,2	63,7	14,6	18/11/20
	as	0,18	0,24	0,38	0,59	0,70	0,81	0,92	0,91	0,79	0,84	0,77	0,75	0,70	0,66	0,63	0,60	0,50	0,52				-
PNL- 65mm- 35kg/m ³ - TE100	TR V	9,96	8,48	7,42	7,32	7,57	7,51	7,20	6,84	6,91	6,89	6,38	5,98	5,60	4,88	4,28	3,77	3,19	2,62	21,5	64,4	14,6	03/11/20
	TR A	5,95	4,61	3,64	2,78	2,65	2,43	2,27	2,29	2,46	2,42	2,42	2,44	2,37	2,32	2,27	2,14	2,08	1,78	21,5	64,5	14,6	03/11/20
	as	0,19	0,28	0,40	0,64	0,70	0,79	0,86	0,83	0,75	0,77	0,73	0,69	0,70	0,65	0,59	0,57	0,48	0,51				-
PNL- 65mm- 40kg/m ³ - TA	TR V	11,05	9,35	7,69	7,91	7,82	8,69	8,69	8,04	7,63	7,34	6,80	6,30	5,96	5,39	4,87	4,21	3,55	3,01	24,5	72,4	14,6	27/11/20
	TR A	6,24	5,01	3,61	2,99	2,56	2,49	2,26	2,17	2,29	2,18	2,17	2,17	2,23	2,23	2,18	2,11	2,04	1,84	24,5	72,4	14,6	27/11/20
	as	0,20	0,26	0,42	0,59	0,75	0,82	0,93	0,96	0,87	0,92	0,89	0,86	0,80	0,75	0,72	0,68	0,60	0,60				-
PNL- 65mm- 40kg/m ³ - TE50	TR V	10,80	8,84	7,69	7,69	7,59	8,38	8,06	7,57	6,96	6,77	6,35	5,99	5,57	5,04	4,52	3,98	3,39	2,84	25,2	68,3	14,7	13/11/20
	TR A	6,06	4,59	3,49	2,68	2,44	2,36	2,22	2,19	2,23	2,26	2,26	2,30	2,33	2,27	2,27	2,19	2,08	1,81	22,2	63,7	14,6	18/11/20
	as	0,21	0,30	0,45	0,69	0,79	0,87	0,94	0,93	0,88	0,86	0,83	0,78	0,73	0,71	0,64	0,59	0,51	0,52				-
PNL- 65mm- 40kg/m ³ - TE100	TR V	9,96	8,48	7,42	7,32	7,57	7,51	7,20	6,84	6,91	6,89	6,38	5,98	5,60	4,88	4,28	3,77	3,19	2,62	21,5	64,4	14,6	03/11/20
	TR A	5,11	4,33	3,15	2,57	2,47	2,32	2,19	2,15	2,36	2,40	2,42	2,40	2,29	2,31	2,27	2,17	2,06	1,76	21,5	64,5	14,6	03/11/20
	as	0,27	0,32	0,52	0,72	0,78	0,86	0,91	0,92	0,80	0,78	0,74	0,72	0,74	0,65	0,59	0,56	0,49	0,53				-

Tabela 12 – Resultados de coeficiente de absorção sonora dos *baffles*

Amostra	Item	Frequência [Hz]																		T (°C)	UR (%)	P (psi)	Data
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1.0k	1.25k	1.6k	2.0k	2.5k	3.15k	4.0k	5.0k				
BFL-60mm- 20kg/m ³ - J250	TR V	9,03	7,03	6,54	6,95	6,85	7,43	7,85	7,49	7,08	6,92	6,26	5,79	5,41	4,78	4,38	3,82	3,25	2,83	26,8	65,7	14,6	22/12/20
	TR A	3,63	2,95	2,70	2,94	2,94	3,33	3,20	3,00	2,82	2,57	2,46	2,39	2,37	2,29	2,19	2,08	2,02	1,74	26,8	65,7	14,6	05/01/21
	as	0,47	0,56	0,62	0,56	0,55	0,47	0,53	0,57	0,60	0,69	0,70	0,70	0,67	0,65	0,65	0,62	0,53	0,63				-
BFL-60mm- 20kg/m ³ - J500	TR V	8,20	6,23	6,63	6,89	6,83	7,56	7,76	7,47	7,25	7,17	6,47	6,02	5,62	4,99	4,43	3,91	3,32	2,83	24,6	66,2	14,6	04/12/20
	TR A	4,69	3,53	3,42	3,67	3,24	3,40	3,34	3,25	3,13	2,96	2,86	2,67	2,52	2,37	2,31	2,15	2,04	1,78	24,6	66,2	14,6	04/12/20
	as	0,24	0,32	0,37	0,33	0,42	0,42	0,44	0,45	0,47	0,51	0,50	0,54	0,57	0,57	0,54	0,54	0,49	0,54				-
BFL-60mm- 20kg/m ³ - J750	TR V	9,93	7,45	7,10	6,86	6,92	7,71	7,62	7,50	7,32	6,93	6,36	5,90	5,50	4,85	4,36	3,83	3,32	2,81	27,1	67,1	14,5	07/01/21
	TR A	5,59	3,80	3,49	3,37	3,78	3,75	3,67	3,53	3,42	3,20	3,05	2,81	2,75	2,59	2,45	2,22	1,99	1,77	29,1	57,2	14,5	11/01/21
	as	0,21	0,34	0,38	0,40	0,32	0,36	0,37	0,39	0,41	0,44	0,45	0,49	0,47	0,47	0,46	0,49	0,51	0,53				-
BFL-60mm- 20kg/m ³ - J1000	TR V	8,56	6,68	6,79	7,15	7,28	7,90	7,65	7,26	7,18	7,00	6,43	5,97	5,53	4,85	4,39	3,84	3,28	2,79	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	TR A	5,91	4,31	4,36	4,29	4,22	4,19	4,17	4,02	3,95	3,55	3,42	3,23	3,05	2,79	2,65	2,46	2,23	1,97	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	as	0,14	0,22	0,22	0,25	0,27	0,30	0,29	0,30	0,31	0,38	0,37	0,38	0,40	0,41	0,40	0,40	0,39	0,41				-
BFL-60mm- 25kg/m ³ - J250	TR V	9,03	7,03	6,54	6,95	6,85	7,43	7,85	7,49	7,08	6,92	6,26	5,79	5,41	4,78	4,38	3,82	3,25	2,83	26,8	65,7	14,6	22/12/20
	TR A	3,36	3,09	2,77	3,43	3,20	3,25	2,88	2,94	2,70	2,61	2,35	2,36	2,29	2,23	2,19	2,07	1,96	1,71	26,8	65,7	14,6	05/01/21
	as	0,53	0,52	0,59	0,42	0,47	0,49	0,62	0,59	0,65	0,68	0,75	0,71	0,72	0,68	0,65	0,63	0,58	0,65				-
BFL-60mm- 25kg/m ³ - J500	TR V	8,20	6,23	6,63	6,89	6,83	7,56	7,76	7,47	7,25	7,17	6,47	6,02	5,62	4,99	4,43	3,91	3,32	2,83	24,6	66,2	14,6	04/12/20
	TR A	4,87	3,35	3,34	3,58	3,24	3,60	3,48	3,17	3,06	2,97	2,69	2,60	2,50	2,33	2,28	2,14	1,98	1,78	24,6	66,2	14,6	04/12/20
	as	0,22	0,36	0,38	0,35	0,42	0,38	0,41	0,47	0,49	0,51	0,56	0,56	0,57	0,59	0,55	0,55	0,53	0,54				-

(continuação)

BFL-60mm- 25kg/m ³ - J750	TR V	9,93	7,45	7,10	6,86	6,92	7,71	7,62	7,50	7,32	6,93	6,36	5,90	5,50	4,85	4,36	3,83	3,32	2,81	27,1	67,1	14,5	07/01/21
	TR A	5,22	3,64	3,51	3,42	3,62	3,65	3,66	3,52	3,56	3,12	2,87	2,81	2,74	2,49	2,36	2,17	2,00	1,75	29,1	57,2	14,5	11/01/21
	αs	0,24	0,37	0,38	0,39	0,35	0,38	0,37	0,40	0,38	0,46	0,50	0,49	0,48	0,51	0,51	0,51	0,50	0,54				-
BFL-60mm- 25kg/m ³ - J1000	TR V	8,56	6,68	6,79	7,15	7,28	7,90	7,65	7,26	7,18	7,00	6,43	5,97	5,53	4,85	4,39	3,84	3,28	2,79	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	TR A	5,84	4,32	4,16	4,03	4,03	4,40	4,04	3,81	3,63	3,45	3,20	3,06	2,92	2,72	2,54	2,41	2,19	1,93	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	αs	0,15	0,22	0,25	0,29	0,30	0,27	0,32	0,34	0,37	0,40	0,42	0,43	0,44	0,44	0,45	0,42	0,41	0,44				-
BFL-60mm- 30kg/m ³ - J250	TR V	9,03	7,03	6,54	6,95	6,85	7,43	7,85	7,49	7,08	6,92	6,26	5,79	5,41	4,78	4,38	3,82	3,25	2,83	26,8	65,7	14,6	22/12/20
	TR A	3,36	2,85	2,68	2,91	3,22	3,10	3,13	2,87	2,71	2,56	2,38	2,31	2,25	2,23	2,17	2,06	1,97	1,74	26,8	65,7	14,6	05/01/21
	αs	0,53	0,59	0,63	0,57	0,47	0,53	0,55	0,61	0,65	0,70	0,74	0,74	0,73	0,68	0,66	0,64	0,57	0,63				-
BFL-60mm- 30kg/m ³ - J500	TR V	8,20	6,23	6,63	6,89	6,83	7,56	7,76	7,47	7,25	7,17	6,47	6,02	5,62	4,99	4,43	3,91	3,32	2,83	24,6	66,2	14,6	04/12/20
	TR A	4,81	3,41	3,12	3,48	3,40	3,40	3,23	3,08	2,98	2,77	2,65	2,54	2,51	2,29	2,24	2,11	2,03	1,81	24,6	66,2	14,6	04/12/20
	αs	0,22	0,34	0,44	0,37	0,38	0,42	0,47	0,49	0,51	0,57	0,58	0,59	0,57	0,61	0,57	0,57	0,49	0,52				-
BFL-60mm- 30kg/m ³ - J750	TR V	9,93	7,45	7,10	6,86	6,92	7,71	7,62	7,50	7,32	6,93	6,36	5,90	5,50	4,85	4,36	3,83	3,32	2,81	27,1	67,1	14,5	07/01/21
	TR A	5,62	3,62	3,28	3,30	3,56	3,65	3,60	3,40	3,31	3,10	2,88	2,78	2,66	2,51	2,35	2,18	1,99	1,73	29,1	57,2	14,5	11/01/21
	αs	0,20	0,38	0,43	0,41	0,36	0,38	0,38	0,42	0,43	0,47	0,50	0,50	0,51	0,50	0,51	0,51	0,51	0,56				-
BFL-60mm- 30kg/m ³ - J1000	TR V	8,56	6,68	6,79	7,15	7,28	7,90	7,65	7,26	7,18	7,00	6,43	5,97	5,53	4,85	4,39	3,84	3,28	2,79	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	TR A	5,45	4,42	3,94	3,82	3,76	4,13	3,86	3,74	3,61	3,26	3,20	2,97	2,86	2,75	2,56	2,37	2,20	1,94	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	αs	0,18	0,21	0,29	0,33	0,35	0,31	0,35	0,35	0,37	0,44	0,43	0,46	0,46	0,43	0,44	0,44	0,41	0,42				-

(continuação)

BFL-65mm- 30kg/m ³ - J250	TR V	9,03	7,03	6,54	6,95	6,85	7,43	7,85	7,49	7,08	6,92	6,26	5,79	5,41	4,78	4,38	3,82	3,25	2,83	26,8	65,7	14,6	22/12/20
	TR A	3,85	2,92	2,75	3,01	2,93	3,18	3,06	2,94	2,72	2,61	2,47	2,41	2,33	2,30	2,20	2,08	1,98	1,70	24,3	52,8	14,6	22/12/20
	as	0,39	0,53	0,55	0,49	0,51	0,47	0,52	0,55	0,60	0,64	0,66	0,66	0,66	0,61	0,60	0,56	0,48	0,53				-
BFL-65mm- 30kg/m ³ - J500	TR V	8,20	6,23	6,63	6,89	6,83	7,56	7,76	7,47	7,25	7,17	6,47	6,02	5,62	4,99	4,43	3,91	3,32	2,83	24,6	66,2	14,6	04/12/20
	TR A	4,47	3,37	3,12	3,66	3,08	3,36	3,28	3,10	2,99	2,85	2,64	2,55	2,47	2,35	2,26	2,13	2,05	1,80	25,1	64,8	14,5	14/12/20
	as	0,25	0,34	0,42	0,32	0,44	0,41	0,44	0,47	0,49	0,52	0,55	0,56	0,56	0,55	0,54	0,53	0,46	0,50				-
BFL-65mm- 30kg/m ³ - J750	TR V	9,93	7,45	7,10	6,86	6,92	7,71	7,62	7,50	7,32	6,93	6,36	5,90	5,50	4,85	4,36	3,83	3,32	2,81	27,1	67,1	14,5	07/01/21
	TR A	5,50	3,45	3,50	3,42	3,69	3,65	3,67	3,42	3,44	3,22	2,91	2,81	2,70	2,54	2,43	2,24	2,08	1,84	27,1	67,1	14,5	07/01/21
	as	0,21	0,40	0,37	0,38	0,33	0,37	0,36	0,41	0,40	0,43	0,48	0,48	0,49	0,48	0,47	0,48	0,47	0,48				-
BFL-65mm- 30kg/m ³ - J1000	TR V	8,56	6,68	6,79	7,15	7,28	7,90	7,65	7,26	7,18	7,00	6,43	5,97	5,53	4,85	4,39	3,84	3,28	2,79	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	TR A	5,28	4,00	3,76	4,14	3,92	4,05	4,07	3,77	3,68	3,42	3,23	3,08	2,94	2,73	2,61	2,41	2,23	1,94	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	as	0,19	0,26	0,31	0,27	0,31	0,32	0,30	0,34	0,35	0,40	0,41	0,42	0,42	0,43	0,41	0,41	0,38	0,41				-
BFL-65mm- 35kg/m ³ - J250	TR V	9,03	7,03	6,54	6,95	6,85	7,43	7,85	7,49	7,08	6,92	6,26	5,79	5,41	4,78	4,38	3,82	3,25	2,83	26,8	65,7	14,6	22/12/20
	TR A	3,83	2,80	2,60	2,83	3,22	3,11	3,25	2,85	2,71	2,55	2,46	2,35	2,33	2,24	2,15	2,06	2,00	1,72	24,3	52,8	14,6	22/12/20
	as	0,40	0,56	0,61	0,55	0,43	0,49	0,47	0,57	0,60	0,66	0,67	0,69	0,66	0,64	0,63	0,58	0,47	0,51				-
BFL-65mm- 35kg/m ³ - J500	TR V	8,20	6,23	6,63	6,89	6,83	7,56	7,76	7,47	7,25	7,17	6,47	6,02	5,62	4,99	4,43	3,91	3,32	2,83	24,6	66,2	14,6	04/12/20
	TR A	5,22	3,57	3,29	3,49	3,33	3,60	3,37	3,08	2,84	2,70	2,59	2,49	2,42	2,35	2,28	2,20	2,16	1,92	25,1	64,8	14,5	14/12/20
	as	0,17	0,30	0,38	0,35	0,38	0,36	0,42	0,47	0,53	0,57	0,57	0,58	0,58	0,56	0,52	0,49	0,39	0,41				-

(continuação)

BFL-65mm- 35kg/m ³ - J750	TR V	9,93	7,45	7,10	6,86	6,92	7,71	7,62	7,50	7,32	6,93	6,36	5,90	5,50	4,85	4,36	3,83	3,32	2,81	27,1	67,1	14,5	07/01/21
	TR A	5,94	3,49	3,51	3,50	3,72	3,59	3,47	3,32	3,15	3,02	2,80	2,71	2,57	2,43	2,37	2,25	2,05	1,80	27,1	67,1	14,5	07/01/21
	as	0,17	0,39	0,37	0,36	0,32	0,38	0,40	0,43	0,47	0,48	0,52	0,51	0,53	0,53	0,50	0,47	0,48	0,51				-
BFL-65mm- 35kg/m ³ - J1000	TR V	8,56	6,68	6,79	7,15	7,28	7,90	7,65	7,26	7,18	7,00	6,43	5,97	5,53	4,85	4,39	3,84	3,28	2,79	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	TR A	5,67	4,39	4,18	4,20	3,71	3,98	3,95	3,73	3,49	3,29	3,13	2,97	2,85	2,75	2,54	2,33	2,15	1,91	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	as	0,16	0,21	0,24	0,26	0,35	0,33	0,32	0,35	0,39	0,43	0,43	0,45	0,45	0,42	0,44	0,45	0,42	0,44				-
BFL-65mm- 40kg/m ³ - J250	TR V	9,03	7,03	6,54	6,95	6,85	7,43	7,85	7,49	7,08	6,92	6,26	5,79	5,41	4,78	4,38	3,82	3,25	2,83	26,8	65,7	14,6	22/12/20
	TR A	3,98	2,60	2,47	2,62	2,92	3,14	3,06	3,00	2,72	2,59	2,50	2,37	2,35	2,24	2,18	2,04	1,99	1,69	24,3	52,8	14,6	22/12/20
	as	0,37	0,64	0,66	0,62	0,51	0,48	0,52	0,53	0,60	0,65	0,65	0,68	0,65	0,64	0,61	0,59	0,47	0,54				-
BFL-65mm- 40kg/m ³ - J500	TR V	8,20	6,23	6,63	6,89	6,83	7,56	7,76	7,47	7,25	7,17	6,47	6,02	5,62	4,99	4,43	3,91	3,32	2,83	24,6	66,2	14,6	04/12/20
	TR A	4,94	3,24	3,14	3,41	3,26	3,50	3,27	2,94	2,80	2,62	2,50	2,43	2,38	2,31	2,29	2,20	2,17	1,89	25,1	64,8	14,5	14/12/20
	as	0,20	0,37	0,41	0,37	0,40	0,38	0,44	0,51	0,54	0,60	0,60	0,60	0,60	0,57	0,52	0,49	0,39	0,43				-
BFL-65mm- 40kg/m ³ - J750	TR V	9,93	7,45	7,10	6,86	6,92	7,71	7,62	7,50	7,32	6,93	6,36	5,90	5,50	4,85	4,36	3,83	3,32	2,81	27,1	67,1	14,5	07/01/21
	TR A	5,86	3,41	3,73	3,24	3,48	3,46	3,59	3,22	3,18	3,03	2,80	2,66	2,51	2,47	2,32	2,15	2,03	1,80	27,1	67,1	14,5	07/01/21
	as	0,18	0,41	0,33	0,42	0,37	0,41	0,38	0,46	0,46	0,48	0,52	0,53	0,56	0,51	0,52	0,53	0,50	0,51				-
BFL-65mm- 40kg/m ³ - J1000	TR V	8,56	6,68	6,79	7,15	7,28	7,90	7,65	7,26	7,18	7,00	6,43	5,97	5,53	4,85	4,39	3,84	3,28	2,79	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	TR A	5,44	4,33	3,90	3,77	3,64	3,94	3,73	3,72	3,46	3,16	3,09	2,94	2,74	2,62	2,47	2,33	2,16	1,93	25,6	65,1	14,7	13/01/21
	as	0,18	0,22	0,29	0,33	0,36	0,34	0,36	0,35	0,40	0,46	0,44	0,46	0,49	0,46	0,47	0,45	0,42	0,42				-