

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**TATIANE BONFIM BREGINSKI**

**DESEMPENHO ACÚSTICO DE CORTINAS EM UM AMBIENTE DE SALA DE  
AULA**

**CURITIBA**

**2021**

**TATIANE BONFIM BREGINSKI**

**DESEMPENHO ACÚSTICO DE CORTINAS EM UM AMBIENTE DE SALA DE  
AULA**

**Acoustic Performance of Curtains in a Classroom Environment**

Trabalho de Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Adalberto Matoski

**CURITIBA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



TATIANE BONFIM BREGINSKI

**DESEMPENHO ACÚSTICO DE CORTINAS EM UM AMBIENTE DE SALA DE AULA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 10 de Agosto de 2021

Prof Adalberto Matoski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Alexandre Augusto Pescador Sarda, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Rodrigo Scoczynski Ribeiro, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/08/2021.

Aos meus cachorros, que apesar de não fazerem a menor ideia, são meu principal ruído, mas também minha maior paixão.

## AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas e as instituições que ajudaram de alguma forma na elaboração dessa pesquisa. Entre elas:

Aos meus pais, Ciro e Herminia, por toda dedicação e apoio, não apenas nessa etapa, mas em todas. Ao meu irmão, Rodrigo, pelo apoio e ajuda sempre que foi necessário.

Ao meu noivo, Antony, por toda dedicação, apoio e paciência prestados não apenas nessa etapa, mas em todos os momentos.

Aos meus amigos, especialmente à Thais e à Giovana, mas a todos que estiveram presentes e me apoiando durante mais essa etapa;

Ao amigo Luis Sant'Ana, por toda ajuda nas medições e também nas preparações dos ensaios e dicas de bibliografia.

À professora Janine, pela paciência, dicas, ideias e toda ajuda prestada. Ao orientador, professor Adalberto Matoski e a banca, professor Marcio Avelar e Rodrigo Ribeiro por todas as dicas, ideias e toda a orientação prestada para este trabalho.

Aos funcionários de diversas empresas consultadas que sempre me receberam muito bem e estavam dispostos a ajudar no que fosse necessário.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por proporcionar esse curso de pós-graduação, e pela oportunidade de continuar fazendo parte dela. Aos professores do PPGECC que auxiliaram direta ou indiretamente na elaboração dessa pesquisa.

Enfim, a todos que de alguma maneira ajudaram na elaboração trabalho.

## RESUMO

BREGINSKI, Tatiane Bonfim. **Desempenho Acústico de Cortinas em um Ambiente de Sala de Aula**. 2021. 96f. Trabalho de Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

O condicionamento acústico dos ambientes possui um papel fundamental no bem-estar e na saúde dos usuários. Diversas soluções são empregadas para esse fim, como tratamento de paredes, tetos, pisos e também a utilização de esquadrias especiais. Tendo em vista que a maior perda de isolamento acústico dentro de uma edificação ocorre nas aberturas e que um ambiente acusticamente adequado é essencial para um bom aprendizado, surge a necessidade de tratamentos alternativos, de baixo custo e fácil instalação para ambientes escolares. Assim, esse trabalho tem como objetivo caracterizar o desempenho acústico de cortinas no ambiente de uma sala de aula. Para isso, foram feitas medições de absorção sonora de diferentes materiais em um tubo de impedância, para facilitar sua caracterização. Posteriormente, foi realizada uma simulação tridimensional da sala de aula no software I-SIMPA para comparações entre materiais. E por fim, foram feitas medições de respostas aos impulsos na sala de aula com determinadas cortinas. Foi observado uma redução de até 38% no tempo de reverberação em determinada frequência com a adição de cortinas no ambiente. Houve também uma redução que variou de 21,7% até 41,4% no tempo de reverberação médio da sala sem cortinas para a sala com cortinas. Mostrando que mesmo abertas, as cortinas possuem um impacto significativo na acústica do ambiente e não apenas podem, como devem também ser utilizadas para o condicionamento acústico de salas de aula.

**Palavras-chave:** Acústica. Cortinas. Salas de Aula. Tecidos. Blackouts. Tubo de Impedância. Tempo de Reverberação. Resposta ao Impulso.

## ABSTRACT

BREGINSKI, Tatiane Bonfim. **Acoustic Performance of Curtains in a Classroom Environment**. 2021. 96p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering - Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2021

The acoustic conditioning of environments plays a fundamental role in the well-being and health of users. Several solutions are used for this purpose, such as the treatment of walls, ceilings, floors and also the use of special frames. Considering that the greatest loss of acoustic insulation within a building occurs in the openings and that an acoustically adequate environment is essential for good learning, there is a need for alternative treatments, which are inexpensive and easy to install for school environments. Thus, this work aims to characterize the acoustic performance of curtains in a classroom environment. For this, sound absorption measurements of different materials were made in an impedance tube, to facilitate its characterization. Subsequently, a three-dimensional simulation of the classroom was performed using the I-SIMPA software for comparisons between materials. And finally, impulse response measurements were taken in the classroom with certain curtains. A reduction of up to 38% in the reverberation time at a given frequency was observed with the addition of curtains in the environment. There was also a reduction ranging from 21.7% to 41.4% in the average reverberation time from the room without curtains to the room with curtains. Showing that even open, curtains have a significant impact on the acoustics of the environment and not only can, but should also be used for the acoustic conditioning of classrooms.

**Keywords:** Acoustics. Curtains. Classrooms. Tissues. Blackouts. Impedance Tube. Reverb Time. Impulse Response.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Nível de Pressão Sonora de Diferentes Fontes .....	20
Figura 2 - Variação da Pressão Ambiente em Função do Tempo.....	21
Figura 3 - Mecanismo da Absorção Sonora .....	23
Figura 4 - Coeficiente de absorção em função da frequência .....	25
Figura 5 - Tubo de Impedância ou de Ondas Estacionárias.....	29
Figura 6 - Interface Inicial do Software i-Simpa .....	30
Figura 7 - Gráfico absorção dos materiais em diferentes frequências .....	31
Figura 8 - Cortina acústica instalada em sala de aula .....	32
Figura 9 - Esquema Tipos de Fibras e Exemplos .....	38
Figura 10 – Fluxograma Materiais e Métodos .....	42
Figura 11 – Amostras dos materiais ensaiados .....	43
Figura 12 – Amostras <i>Blackouts</i> .....	44
Figura 13 – Pesagem das amostras .....	48
Figura 14 – Microscópio Material A - Náilon Dublado.....	49
Figura 15 – Microscópio Material I - <i>Soft</i> .....	50
Figura 16 – Microscópio Material J - <i>Microsoft</i> .....	51
Figura 17 – Microscópio Material K – Manta Fanelada.....	51
Figura 18 – Microscópio Material H – <i>Jacquar Matelassê</i> .....	52
Figura 19 – Material A - Náilon Dublado.....	52
Figura 20 –Material B – Courino Matelassê .....	53
Figura 21 –Material C – Courino Liso .....	53
Figura 22 –Material D – Náilon 70 .....	54
Figura 23 – Material E - Bagum .....	54
Figura 24 – Fotografia Tecidos .....	55
Figura 25 – Fotografia Tecido H .....	55
Figura 26 - Representação Esquemática do Tubo de Impedância. ....	56
Figura 27 – Modelagem Sala de Aula .....	59
Figura 28 – Modelagem Sala de Aula .....	60
Figura 29 – Superfície Receptora I-Simpa .....	61
Figura 30 – Perspectivas da Sala de Aula .....	62
Figura 31 – Planta da Sala de Aula .....	63
Figura 32 – Esquema Equipamentos .....	64
Figura 33 – Ensaio Resposta ao Impulso.....	65



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação polímeros quanto ao comportamento mecânico.....	34
Quadro 2 - Blackouts Utilizados no Ensaio Preliminar.....	44
Quadro 3 - Tecidos Utilizados Ensaio Preliminar.....	45
Quadro 4 - Tecidos Utilizados Ensaio Preliminar.....	47
Quadro 5 - <i>Blackouts</i> Utilizados Ensaio Preliminar.....	47
Quadro 6 – Densidades e Espessuras dos Materiais.....	48
Quadro 7 - Dimensões tubo de impedância.....	57
Quadro 8 - Absorção por Banda de Oitava.....	69
Quadro 9 - Desvio Padrão por Banda de Oitava.....	69
Quadro 10 – Valores obtidos de <i>NRC</i> .....	76
Quadro 11 – Valores obtidos de <i>T20</i> no I-Simpa.....	77
Quadro 12 – Comparação <i>T20</i> Simulado e Medido.....	80

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Medições de Absorção x Frequência em Tecidos e <i>Blackouts</i> .....	66
Gráfico 2 – Medições de Absorção x Frequência com e sem Porta Amostra e Tubo Vazio .....	67
Gráfico 3 – Medições de Absorção x Frequência Resumo.....	68
Gráfico 4 – Medições de Absorção x Frequência Tubo vazio e com porta amostra .	68
Gráfico 5 – Média de Absorção por Banda de Oitava.....	70
Gráfico 6 - Medições Absorção x Frequência Tecidos .....	71
Gráfico 7 - Medições Tecidos duas camadas Absorção x Frequência .....	71
Gráfico 8 - Medições Tecidos três camadas Absorção x Frequência .....	72
Gráfico 9 - Medições <i>Blackouts</i> Absorção x Frequência .....	73
Gráfico 10 - Medições <i>Blackouts</i> duas camadas Absorção x Frequência .....	74
Gráfico 11 - Medições <i>Blackouts</i> três camadas Absorção x Frequência .....	75
Gráfico 12 – Resumo Medições NRC x Frequência .....	75
Gráfico 13 – Medições Tempo de Reverberação.....	78
Gráfico 14 – Comparação Percentual Sala com Cortinas e sem Cortinas .....	79
Gráfico 15 – Comparação Percentual entre Cortinas .....	80

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
ASTM	American Society for Testing and Materials
FAO	Food and Agriculture Organization
IEMI	Instituto de Estudos e Marketing Industrial
Lp	Soud Pressure Level
NBR	Norma Brasileira
NRC	Noise Reduction Coeficient
PVA	Acetato de Polivinila
PVC	Policloreto de Vinila
SLP	Soud Pressure Level
TNT	Tecido Não Tecido
TR	Tempo de Reverberação
WHO	World Health Organization

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	16
<b>2 DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>19</b>
2.1 ACÚSTICA .....	19
2.1.1 Características do Som .....	19
2.1.1.1 Ruído .....	20
2.1.1.2 Frequência .....	21
2.1.2 Acústica de Recintos .....	21
2.1.2.1 Absorção sonora.....	22
2.1.2.2 Reflexão sonora.....	26
2.1.2.3 Tempo de reverberação .....	26
2.1.2.4 Inteligibilidade da fala .....	27
2.1.3 Instrumentos de Medição .....	28
2.1.3.1 Tubo de impedância .....	28
2.1.3.2 O software <i>i-Simpa</i> .....	29
2.1.4 Soluções Acústicas.....	30
2.1.4.1 Absorvedores .....	30
2.1.4.2 Esquadrias acústicas.....	31
2.1.4.3 Cortinas acústicas.....	32
2.2 MATERIAIS ABSORVEDORES .....	33
2.2.1 Polímeros .....	33
2.2.1.1 Quanto ao comportamento mecânico .....	33
2.2.1.2 Quanto à estrutura química .....	35
2.2.2 Têxteis.....	35
2.2.2.1 Fibras.....	37
2.2.2.1.1 <i>Fibras Naturais</i> .....	38
2.2.2.1.2 <i>Fibras Manufaturadas</i> .....	39
2.2.2.1.3 <i>Fibras artificiais</i> .....	39
2.2.2.1.4 <i>Fibras sintéticas</i> .....	40
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>42</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	42
3.2 MATERIAIS .....	42
3.2.1 Etapa 1 – Ensaio Preliminar .....	43
3.2.2 Etapa 2 – Definição dos Materiais .....	45
3.2.3 Etapa 3 – Caracterização dos Materiais .....	46
3.2.3.1 Ensaio de densidade .....	47

3.2.3.2 Fotografias Microscópicas .....	49
3.2.3.3 Fotografias dos Materiais .....	52
3.3 MÉTODOS .....	56
3.3.1 Etapa 1 – Ensaio de Absorção Acústica .....	56
3.3.1.1 Equipamentos e programas computacionais para o ensaio .....	57
3.3.2 Etapa 2 - Técnica de Simulação com Software I-Simpa .....	59
3.3.3 Etapa 3 - Preparo do Ambiente .....	61
3.3.4 Etapa 4 – Ensaio de Resposta ao Impulso .....	63
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
4.1 ENSAIO PRELIMINAR .....	66
4.2 ENSAIO ABSORÇÃO ACÚSTICA .....	70
4.3 SIMULAÇÃO SOFTWARE I-SIMPA .....	76
4.4 ENSAIO DE RESPOSTA AO IMPULSO .....	78
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>82</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	83
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE A - Estrutura Química dos Polímeros .....</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O conforto ambiental estuda a necessidade do ser humano em torno do seu bem-estar, abrangendo áreas como o conforto acústico, térmico, luminoso e ergométrico (PISANI, 2008). Já na Roma Antiga sabia-se dos efeitos danosos do ruído ao sono. Carruagens foram proibidas de circular durante o período noturno por conta do barulho das rodas batendo nas pedras do pavimento. Séculos mais tarde, algumas cidades da Europa Medieval proibiram carruagens e cavalos nas ruas à noite, outras cobriram as ruas com palha para reduzir o ruído e melhorar o sono de seus habitantes (GOINES, 2007).

Atualmente, cerca de 55% da população mundial vive em áreas urbanas. Esse número provavelmente chegará em 68% em 2050, sendo uma das principais tendências do século XXI. Apesar do bem-estar dos cidadãos ser a prioridade das grandes cidades, metade da humanidade ainda sofre com moradias, transportes, saneamento, enfim, toda uma infraestrutura inadequada (WHO, 2020a).

O aumento, muitas vezes desordenado, de diversos fatores, como a construção civil, tráfego de veículos e indústrias, tem elevado o nível de ruído nas grandes cidades, e contribuído para que as edificações se tornem ambientes cada vez mais desagradáveis (BISTAFA, 2018). No século XXI, ocorre uma praga de ruído ambiental da qual é muito difícil escapar: nos carros, nas casas, nas ruas, no quintal, lugares públicos ou privados, o barulho é imposto aos habitantes das grandes cidades não importa onde estejam (GOINES, 2007).

Devido a isso, o ruído hoje é reconhecido como um agente nocivo à saúde, e mais recentemente também cresce o debate acerca desse problema, considerado de saúde pública (PALMA, 2009). Ao contrário de muitos outros problemas ambientais e urbanos, a poluição sonora continua a crescer e é acompanhada por um número crescente de reclamações (WHO, 2020c). Segundo dados da *World Health Organization*, (2020b), o ruído excessivo pode impactar severamente as atividades da população, causando desde distúrbios no sono, até aumento de risco cardiovascular e efeitos psicológicos.

É também uma séria ameaça à saúde física e psicológica das crianças, podendo interferir negativamente não apenas na aprendizagem, mas no comportamento, causando desde dificuldade na concentração até perda auditiva

permanente (EPA, 2009). No ambiente escolar, estudos tem demonstrado que o ambiente inadequado, além de dificultar o aprendizado dos alunos, pode causar também abuso vocal de professores. (GASPARINI *et al.*, 2006; PIZOLATO *et al.*, 2013). Sintomas como rouquidão, fadiga vocal e dor de garganta são sinais de uso excessivo da voz e de abuso vocal e podem contribuir para o desenvolvimento de uma doença ocupacional (LIMA-SILVA, 2012).

Outros estudos também mostram que os professores estão entre os profissionais que mais procuram ajuda médica em decorrência de problemas relacionados com a voz. (CUTIVA e BURDORF, 2015; GONÇALVES, 2009; DE MEDEIROS *et al.*, 2008). Outro estudo de Kristiansen *et al.* (2011), na Dinamarca, mostrou que a perturbação das crianças devido a exposição ao ruído está associada ao tempo de reverberação, ou seja, ao condicionamento acústico do ambiente.

O controle de ruído pode ser feito de diversas formas. Uma atuação direta na fonte geradora, ou para proteger diretamente os indivíduos dos efeitos nocivos da exposição, como com o uso de fones de ouvido, ou uma atuação no ambiente (CDC, 2018). Quando se trata de medidas no ambiente, há duas formas de intervenção mais comumente utilizadas: o isolamento, que consiste em barrar o ruído de um ambiente, tanto de fora para dentro, quanto de dentro para fora; e o condicionamento, que consiste em tratar o ambiente de forma a alcançar parâmetros (como tempo de reverberação e inteligibilidade) de acordo com a função do ambiente. Um condicionamento acústico ideal depende da finalidade do ambiente (SEGURA-ALCARAZ, 2018).

Materiais como vidro e concreto, ou seja, os comumente utilizados para a construção, apesar de isolantes, são também materiais refletores, e criam um campo reverberante no ambiente, o que, em algumas situações, gera um ambiente acusticamente desconfortável (PIEREN, 2018). O conforto acústico geralmente não é levado em consideração no momento da construção. Os usuários não o priorizam ao construir ou comprar um imóvel, seja por falta de conhecimento e orientação ou por falta de opção (FERREIRA e ZANNIN, 2007).

Como o tijolo e a alvenaria são bons materiais isolantes, geralmente a propagação de ruído nos ambientes ocorre pelas aberturas, ou seja, pelas esquadrias, que comumente são concebidas com pouca tecnologia, vitragem e uma vedação simples, o que não promove uma adequada estanqueidade do som (PISANI, 2008).

Melhorias no ambiente podem ser alcançadas com a introdução de materiais absorvedores e difusores. Além de diminuir a reverberação, alguns destes materiais aumentam a inteligibilidade da fala e podem deixar o ambiente mais confortável. (PIEREN, 2018). Como as técnicas de melhoria aplicadas a fachadas e esquadrias geralmente são de alto custo, surgem novos materiais como uma alternativa mais simples e acessível para universalizar o acesso a um ambiente acusticamente confortável (PISANI, 2008).

As cortinas de tecido podem ser projetadas para funcionar como um bom absorvedor de som (PIEREN, 2018); e as cortinas blackouts, em substituição de persianas e venezianas, também podem ser uma alternativa para melhorar o conforto acústico dos indivíduos (PISANI, 2008).

Assim, estuda-se a possibilidade de utilizar um elemento decorativo, como as cortinas, para realizar a função de condicionador acústico, variando o material de sua fabricação, como forma de atenuar esse problema, com um custo de implantação reduzido e não necessitando reformas de grande porte nas edificações, como a troca de esquadrias.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O condicionamento acústico dos ambientes, assim como a absorção acústica, tem um papel fundamental no bem-estar e na saúde dos usuários, não apenas em ambientes escolares, mas em todos os ambientes. Diversas soluções são empregadas para esse problema, como tratamento de paredes, tetos, pisos e também a utilização de esquadrias especiais.

Tendo em vista que a maior perda de isolamento acústico dentro de uma edificação ocorre nas aberturas e que esquadrias com tratamento acústico ainda não são comumente utilizadas na maior parte das construções brasileiras, especialmente nos ambientes de ensino públicos, e que um ambiente acusticamente adequado é essencial para um bom aprendizado, há a necessidade de tratamentos alternativos, de baixo custo e fácil instalação para esses ambientes.

Além disso, considerando que ainda faltam dados na literatura sobre espalhamento sonoro de diferentes tipos de materiais, assim como sua influência no



condicionamento dos ambientes em diferentes aplicações, esse trabalho irá analisar diferentes tipos de tecidos e plásticos, que podem ser usados como *blackouts*, no tubo de impedância quanto a absorção acústica, reproduzir os dados no *software* I-SIMPA, e posteriormente analisar uma cortina dentro de uma sala de aula.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho acústico de cortinas em um ambiente de sala de aula.

### 1.3.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Caracterizar acusticamente diferentes tipos de tecidos e blackouts;
- Avaliar a absorção acústica dos diferentes tipos de tecidos e blackouts e suas combinações por meio do tubo de impedância.
- Avaliar as simulações dos diferentes tipos de materiais na sala de aula no *software* I-SIMPA;
- Identificar o tempo de reverberação ( $T_{20}$ ), como parâmetro acústico objetivo por meio de respostas aos impulsos;

## 1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em todo o mundo, diversos estudos analisam o impacto do ruído e do conforto acústico e procuram possíveis soluções para salas de aula. Na China, Wen *et al.* (2019) estudaram o impacto do tráfego urbano no conforto acústico de escolas na beira de rodovias. Na Itália, Fiachini (2018) apresentou uma análise dos diferentes tipos de ruídos em escolas e as condições que os amplificam ou produzem, discutindo a necessidade de integração de diferentes estratégias e intervenções para melhora do conforto acústico. Levandoski e Zannin (2020), em Curitiba, analisaram os níveis

de pressão sonora, ruído de fundo e tempos de reverberação em salas de aula comparados a percepção e o impacto causado à saúde dos professores.

Entre os trabalhos que analisam as possíveis intervenções no ambiente escolar no Brasil está o estudo feito por Ribeiro (2020) na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no qual foi analisado o uso de painéis de madeira para condicionamento acústico de salas de aula. Na Universidade de Santa Maria existem mais estudos sobre acústica, como o de Pisani (2008), que analisou cortinas blackout como componentes de isolamento sonoro de fachadas, chegando a um aumento de 2 a 5dB no índice de isolamento sonoro.

Internacionalmente, existem estudos ainda mais avançados de acústica e controle de ruído, como utilização de esquadrias com controle ativo de ruído, isto é, janelas que emitem sons em uma determinada frequência que anule o ruído externo, permitindo assim, que a janela fique aberta, mesmo com ruído externo (BHAN e WOON-SENG, 2016).

Alguns estudos analisaram especificamente as características das fibras de têxteis e as propriedades acústicas desses materiais. Segura-Alcaraz (2018) analisou alguns tecidos em combinações com TNT (tecido não tecido) de diferentes espessuras e conseguiu obter coeficientes de absorção próximos a 1. Yang *et al.* (2011) analisaram a absorção acústica de alguns materiais fibrosos como cashmere, sumaúma e fibras acrílicas e observaram que o coeficiente de absorção aumenta acentuadamente em uma faixa de baixa frequência, atingindo um máximo em uma frequência moderada. E então diminui lentamente quando a frequência é ainda mais alta, demonstrando que existe uma frequência que maximiza a capacidade de absorção do conjunto. Além disso, a propriedade de absorção de som aumentou com a porosidade, com a baixa densidade de fibra e com o baixo diâmetro de fibra.

Hao *et al.* (2013), da Universidade do Texas, estudaram compósitos não tecidos de kenaf/polipropileno nas propriedades acústicas, mecânicas e térmicas. Eles descobriram que as estruturas em sanduíche possuem excelentes valores de absorção de som. Demiryürek e Aydemir (2017), na Turquia, utilizaram um tubo de impedância para analisar cortinas de enrolar feitas de acrílico e poliéster, e buscaram qual seria a proporção ideal de acrílico para uma melhor absorção sonora, chegando a conclusão que valores ideais de absorção e reflexão sonora são alcançados com uma taxa de acrílico de 40%.

As cortinas, tanto de tecidos quanto *blackouts*, popularmente usadas nos mais diversos ambientes, têm o potencial de serem utilizados especificamente para condicionamento acústico. Apesar do uso frequente, existem poucos estudos que analisam diferentes tipos de tecidos e materiais e diferentes tipos de combinações na função acústica. E há ainda menos estudos empíricos sobre comportamento desses materiais em um ambiente de sala de aula.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 ACÚSTICA

De acordo com Bistafa (2018), a acústica é a ciência do som, incluindo desde a sua geração até a transmissão e seus efeitos. A acústica, então, engloba diversas áreas e atividades. Primeiramente, a onda mecânica, gerada por causas naturais e pelas atividades humanas, depois, pela sensação da audição, a capacidade vocal humana, a comunicação e os diversos efeitos psicológicos também provocados pelo som. Estando presente em áreas de produção e percepção de fala, música, telefonia, medicina, arquitetura e, é claro, em controle de ruído.

O som que é ouvido na maioria dos ambientes é uma combinação do som direto da fonte, ou fontes, e os reflexos indiretos de superfícies e outros objetos. Por exemplo, na acústica de uma sala, tanto o som direto quanto os reflexos das paredes, do teto e do piso são fundamentais para determinar a qualidade da acústica. Portanto, um dos tópicos centrais da acústica é como manipular esses reflexos que alteram a forma como o som se comporta e, em última análise, é percebido (COX e D'ANTONIO, 2017).

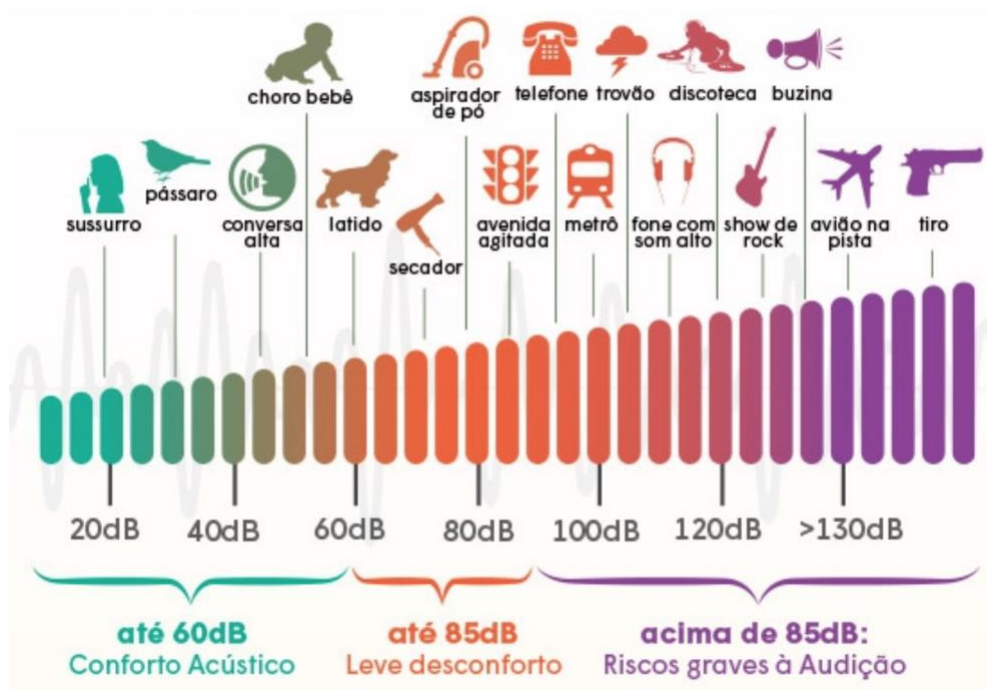
#### 2.1.1 Características do Som

O som é definido, de acordo com a NBR 16313 (2014), como alterações de pressão em torno da pressão ambiente nas frequências compreendidas entre 20 Hz e 200Hz. Ou seja, o som é uma variação da pressão ambiente que é detectável pelo sistema auditivo. Considerando que a pressão ao nível do mar é 101.350 Pa, a menor variação de pressão detectável pelo ouvido humano é 0,00002 Pa. A essa pressão chama-se o limiar da audição, enquanto a variação de pressão ambiente capaz de provocar dor (limiar da dor) possui valores entre 20 e 200 Pa (BISTAFA, 2018).

Por conta dessa enorme variação entre as pressões detectáveis pelo ouvido humano, adotou-se uma escala logarítmica para expressar de uma forma mais simples e didática essas pressões, a essa escala dá-se o nome de decibel (dB). O decibel é uma unidade adimensional utilizada para expressar o Nível de Pressão Sonora (*Sound Pressure Level – SLP ou Lp*) (WANG *et al.*, 2005).

Na Figura 1 está representado o nível de pressão sonora de diferentes fontes.

**Figura 1 – Nível de Pressão Sonora de Diferentes Fontes**



Fonte: Farol (2018).

### 2.1.1.1 Ruído

Fisicamente, não há diferença entre som e ruído. O som é uma percepção sensorial, enquanto o padrão complexo das ondas sonoras é denominado ruído, música, fala, etc. O ruído é, portanto, definido simplesmente como som indesejado (WHO, 2020c).

Já Araújo (2002) conceitua ruído pelos efeitos nocivos provocados ao ser humano, definindo-o como uma “sensação auditiva desagradável”. Ou seja, como esse conceito passa pelas sensações, cabe ressaltar que o que é ruído para uma pessoa, pode ser música para outra.

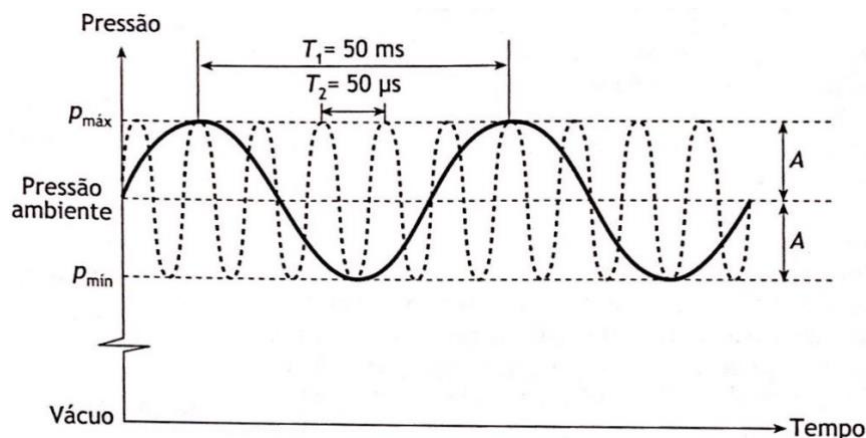
A maioria dos ruídos ambientais pode ser descrita por várias medidas simples. Todas as medidas consideram o conteúdo da frequência dos sons, os níveis gerais de pressão sonora e a variação desses níveis com o tempo. A pressão do som é uma medida básica das vibrações do ar que constituem o som. Como a gama de pressões sonoras que os ouvintes humanos podem detectar é muito ampla, esses níveis são

medidos em uma escala logarítmica com unidades de decibéis. Conseqüentemente, os níveis de pressão sonora não podem ser adicionados ou calculados aritmeticamente (WHO, 2020c).

### 2.1.1.2 Frequência

Frequência é, de uma forma simples, o número de vezes que um ciclo se repete na unidade de tempo (NUSSENZVEIG, 2018). Enquanto o período é o intervalo de tempo para que um ciclo se complete na curva de variação da pressão ambiente e do tempo, logo, a frequência é o inverso do período. E a sua unidade é ciclos por segundo, ou hertz (Hz) (BISTAFA, 2018). Uma imagem que ilustra essa diferença é a Figura 2, na qual a onda tracejada representa um som com uma alta frequência (sons mais agudos), e a outra onda um som com uma baixa frequência (sons mais graves).

**Figura 2 - Variação da Pressão Ambiente em Função do Tempo**



**Fonte: Bistafa (2018).**

### 2.1.2 Acústica de Recintos

Entre os problemas que o ruído pode causar dentro de recintos, está a redução da inteligibilidade da fala dentro de uma sala de aula, a dificuldade de

concentração em uma biblioteca, a perturbação do sono em um dormitório ou a dificuldade de comunicação em uma sala de estar (BISTAFA, 2018).

Na Europa, América do Norte e Japão, a qualidade acústica dos ambientes se tornou norma social aplicada nos mais diferentes tipos de sala. Dado o tempo que passamos em ambientes fechados, é impressionante pensar que a acústica do ambiente geralmente não é planejada na fase de projeto, ou em nenhuma fase, em outros lugares do mundo, como no Brasil (BRANDÃO, 2019).

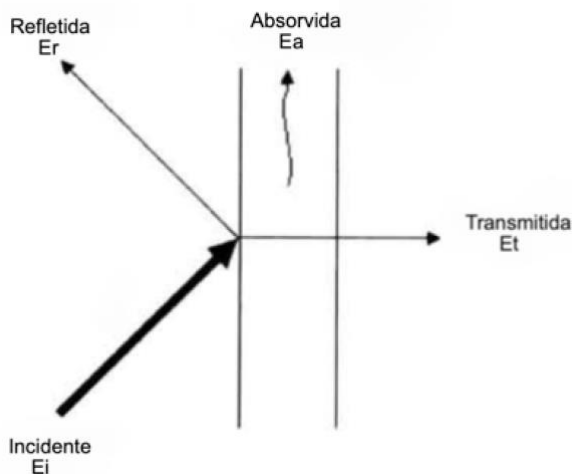
Apesar de na prática a acústica ainda não ser comumente levada em conta nas construções brasileiras, a norma de desempenho NBR 15575 – Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais, em vigor desde 2013, trata de desempenhos mínimos, intermediários e superiores de isolamento de ruídos aéreos, de impacto, de vedações e de fachada das edificações. Também estão em vigor as normas NBR 10152 – Níveis de Pressão Sonora em Ambientes Internos a Edificações (2020), que trata dos níveis de ruído máximos para o conforto acústico de cada ambiente e a NBR 10151 – Medição e Avaliação de Níveis de Pressão Sonora em Áreas Habitadas (2020), que trata do procedimento para a medição e avaliação de níveis de pressão sonora em edificações.

Ao ar livre, como o nome já diz, a propagação da onda se dá de forma livre, sem interferência de obstáculos e, por consequência, de outras ondas. Já dentro de um ambiente fechado, a propagação sofre interferência das ondas refletidas pelas superfícies que delimitam o espaço. Portanto, quando um som incide em uma superfície qualquer, parte da energia sonora é refletida, enquanto outra parte, que desaparece pela superfície, é dividida em duas: a parte absorvida e a parte transmitida (BISTAFA, 2018).

#### 2.1.2.1 Absorção sonora

A absorção sonora é a relação entre a energia transmitida e absorvida por um determinado elemento, e a energia incidente nesse elemento (LONG, 2014). Na Figura 3 pode ser observado um diagrama com as energias envolvidas no processo.

**Figura 3 - Mecanismo da Absorção Sonora**



**Fonte: Adaptado de Gonçalves (2008).**

Um estudo bastante completo sobre a absorção de materiais é descrito por Bistafa (2018). A capacidade da superfície de absorver o som é dada pelo coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ). Esse coeficiente é dado pela Equação 1.

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} = \frac{E_{\text{incidente}} - E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (1)$$

Onde,  $E_{\text{absorvida}}$  é a energia sonora absorvida, ou seja, a  $E_{\text{absorvida}} = E_{\text{dissipada}} + E_{\text{transmitida}}$ ;  $E_{\text{refletida}}$  é a energia refletida e;  $E_{\text{incidente}}$  é a energia sonora incidente.

Já o coeficiente de reflexão sonora ( $\rho$ ) é dado pela Equação 2:

$$\rho = \frac{E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2)$$

Por meio dessas das Equações 1 e 2, verifica-se que  $\alpha = 1 - \rho$ . Logo, quando o coeficiente de absorção for 1, o de reflexão será 0, e a superfície será totalmente absorvente ( $E_{\text{refletida}} = 0$ ). Já para um coeficiente de reflexão 1, o de absorção será 0 e a superfície será totalmente reflexiva ( $E_{\text{refletida}} = E_{\text{incidente}}$ ) (BISTAFA, 2018). Já um material que possui coeficiente de absorção acústica de 0,3 significa que o material absorve 30% da energia que incide sobre o mesmo, refletindo 70% da energia total (GONÇALVES, 2008).

Em seu trabalho, Bistafa (2018) mostra que, de acordo com essas equações, uma janela simplesmente aberta seria um ótimo absorvedor de som, pois a



$E_{refletida} = 0$  e  $\alpha = 1$ . Neste caso, a energia absorvida se deve em sua totalidade a  $E_{transmitida}$ . Apesar do valor, não é dessa forma que comumente são tratados os ambientes, até porque nem sempre é possível manter a janela aberta. Para isso são utilizados materiais absorvedores acústicos, que fazem uso da energia dissipada na sua estrutura para absorver o som. Os materiais mais utilizados como absorvedores de som são materiais fibrosos, como lã de vidro, lã de rocha; ou porosos, como espumas de poliuretano. Geralmente, são materiais leves e que não possuem características estruturais.

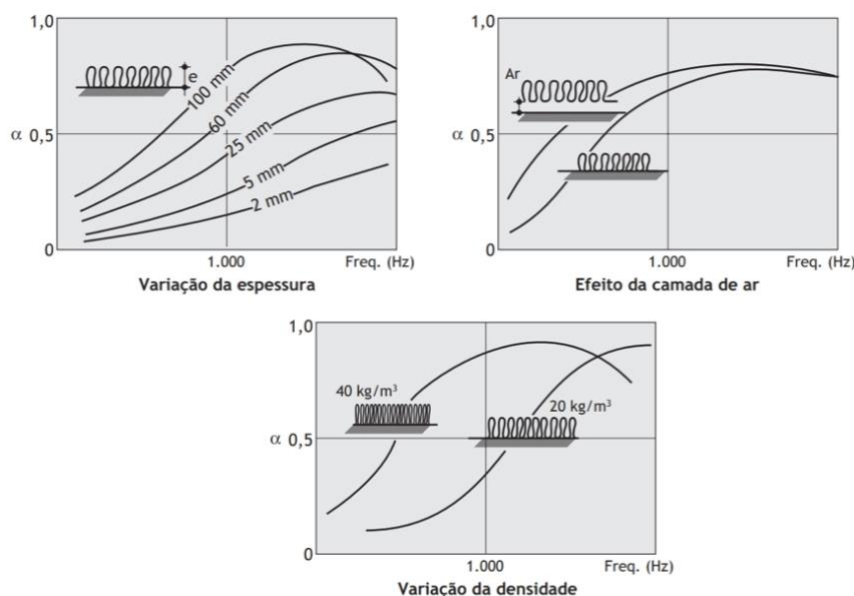
Essa absorção se dá essencialmente pela dissipação da energia sonora por atrito, por conta da movimentação das partículas de ar no interior do material. Por isso um bom absorvedor é um material que permite às partículas do ar penetrar e se movimentar em seu interior. Tecidos com trama muito estreita, assim como os com trama muito esparsa, são ineficazes para absorção sonora (GERGES, 1992).

Se o material absorvedor for novamente colocado na janela aberta, a energia dissipada continuará sendo a maior responsável pela absorção sonora, pois apenas a estrutura da lã de rocha ou do tecido não permite que a energia sonora incidente escape. Para que esses materiais tenham toda a sua capacidade de dissipar energia, eles precisam estar aplicados sobre uma superfície sólida. Assim, a onda refletida se combina com a incidente, gerando uma onda estacionária, o que provoca uma dissipação por atrito (BISTAFA, 2018).

Por isso também há a denominação de dissipadores acústicos. Com a presença da superfície sólida, a energia transmitida é muito pequena se comparada a energia dissipada, sendo a dissipação o principal mecanismo de absorção. No caso de materiais absorventes instalados sobre superfícies  $E_{absorvida} = E_{dissipada}$ , por isso, se torna importante também a forma como esses materiais são instalados, pois o coeficiente de absorção varia conforme a frequência da onda e o tipo de montagem (COX e D'ANTONIO, 2017).

Na Figura 4 está esquematizado o comportamento de diferentes coeficientes de absorção em função da frequência, conforme a variação da espessura do material utilizado, da densidade e da camada de ar. É possível observar que o  $\alpha$  aumenta com a espessura e a densidade de materiais fibrosos/porosos. Também é possível observar na Figura 4 o efeito de camada de ar, ou seja, o afastamento da superfície tende a aumentar a absorção sonora, principalmente nas baixas frequências.

**Figura 4 - Coeficiente de absorção em função da frequência**



**Fonte: Bistafa (2018).**

Junto às paredes, a pressão sonora é máxima, enquanto a velocidade das partículas é zero, as partículas de ar não se movimentam junto a uma parede sólida. Para a velocidade das partículas ser máxima a pressão sonora deve ser mínima, e isso ocorre a uma distância da parede igual a  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda ( $\lambda$ ) do som incidente. Ou seja, para baixas frequências, o material absorvente deve ser mais espesso, se isso não for possível ou for muito custoso, o material pode ser afastado da parede  $\lambda/4$  (BISTAFA, 2018).

Dado que o comprimento de onda,  $\lambda/4 = c/4f$ , onde  $c$  é a velocidade do som, para uma frequência de 200Hz, a distância que o material deve ser afastado da parede seria de 42,5cm.

O Coeficiente de Redução Sonora (*Noise Reduction Coefficient*, NRC) é definido, conforme a norma norte-americana ASTM C423-17 (2017), como a média dos coeficientes de absorção sonora das bandas de oitava de 250 a 2000Hz, com um arredondamento para o múltiplo de 0,05 mais próximo (Equação 3). Ele sintetiza a capacidade de absorção sonora de um determinado material, sendo útil para uma primeira análise a para comparações gerais entre materiais.

$$NRC = \frac{1}{4} [\alpha(250Hz) + \alpha(500Hz) + \alpha(1000Hz) + \alpha(2000Hz)] \quad (3)$$

Existem três formas de determinar o coeficiente de absorção sonora: o método do tubo de impedância para um coeficiente de absorção com incidência normal; o método da câmara reverberante, para um coeficiente de absorção sob incidência difusa e o método de medição *in situ* para coeficientes de incidência oblíqua (RIBEIRO, 2020).

Neste estudo é utilizado o primeiro método, aliado à simulação computacional, para avaliação do desempenho dos materiais como condicionante acústico.

#### 2.1.2.2 Reflexão sonora

Quando uma onda sonora encontra uma superfície lisa e dura, ocorre a reflexão. No retorno dessa onda, é produzida uma série de ondas refletidas, que se propagam no sentido inverso da onda original. A reflexão do som pode produzir dois fenômenos distintos, o eco e a reverberação.

Vetorialmente, em meios homogêneos e isotrópicos, o comportamento da onda sonora obedece às leis de reflexão da luz, sendo que a onda refletida possui o mesmo ângulo com a superfície que a onda incidente. Devido ao formato das ondas, sons de alta frequência tendem a sofrer mais reflexões do que sons de baixas frequências, e o som que chega ou ouvinte é uma composição do som direto e das reflexões sonoras (NUSSENZVEIG, 2018).

#### 2.1.2.3 Tempo de reverberação

Quando uma fonte sonora que emite ondas em um ambiente é desligada, decorre um determinado período de tempo até que a energia sonora seja totalmente absorvida pelas superfícies desse compartimento (BARON, 2003).

Como todos os ambientes estão sujeitos a um ruído de fundo, definiu-se o tempo de reverberação (TR) como sendo o tempo que demora para um ruído a decair em 60 (sessenta) dB, após ser interrompida a sua emissão, sendo sua medição normatizada pela ABNT NBR ISO 3382-1(2017) (SILVA, 2013).

Embora atualmente sejam utilizadas outras grandezas igualmente importantes na determinação da qualidade acústica de salas, como a Definição ( $D_{50}$ ),

Clareza ( $C_{80}$ ) e Índice de Transmissão de Fala (STI), a medição do tempo de reverberação é uma tarefa fundamental, pois este pode estar fortemente relacionado com as restantes características e influenciar como um todo as condições acústicas da sala (PEREIRA, 2010).

Existem diversas expressões simplificadas de previsão do tempo de reverberação, porém a mais utilizada pela simplicidade, é a de Sabine, apesar de ser válida apenas para situações com baixa absorção sonora e locais com campos sonoros difusos (DA ROCHA, 2014). Sabine relacionou o volume, a absorção sonora e o tempo de reverberação, deduzindo a Equação 4 (SILVA, 2013):

$$T = \frac{0,16 V}{A} \quad (4)$$

Onde, T é o tempo de reverberação (s); V é o volume do compartimento ( $m^3$ ); A é absorção sonora equivalente ( $m^2$ ), dada pela Equação 5 (DA ROCHA, 2014):

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (5)$$

Onde,  $\alpha$  é o coeficiente de absorção sonora do material e S é a superfície real do material ( $m^2$ ) (DA ROCHA, 2014).

#### 2.1.2.4 Inteligibilidade da fala

A inteligibilidade da fala em geral é influenciada por diversos fatores, como nível da fala, pronúncia da fala, distância locutor-ouvinte, nível de som e outras características do ruído de interferência, acuidade auditiva, e até mesmo nível de atenção. Em ambientes internos, a comunicação por fala também é afetada pelas características de reverberação da sala e as características do ambiente (WHO, 2020c).

Para a inteligibilidade da frase completa em ouvintes com audição normal, a relação sinal-ruído (ou seja, a diferença entre o nível de fala e o nível de som do ruído de interferência) deve ser de pelo menos 15 dB. Como o nível de pressão sonora da fala normal é de cerca de 50 dB, o ruído com níveis de som a partir de 35 dB já interfere na inteligibilidade da fala. Para grupos mais vulneráveis, são necessários ruídos de fundo ainda mais baixos, e um tempo de reverberação abaixo de 0,6 s é desejável

para a inteligibilidade de fala adequada, mesmo em um ambiente silencioso (WHO, 2020c).

Existem diversos testes para a avaliação da inteligibilidade da fala, divididos em dois grupos: testes objetivos e subjetivos. Os testes subjetivos baseiam-se em leituras de frases ou palavras para um grupo que as escreve, e conforme maior percentual de acerto, maior será a inteligibilidade. Já os testes objetivos são realizados por aparelhos, não necessitando da resposta humana, apresentando menor probabilidade de erros (SILVA, 2013).

A incapacidade de compreender a fala resulta em um grande número de limitações pessoais e mudanças comportamentais. Particularmente vulneráveis são os deficientes auditivos, os idosos, as crianças em processo de aquisição da linguagem e da leitura e os estrangeiros que não conhecem a língua falada (WHO, 2020c).

### 2.1.3 Instrumentos de Medição

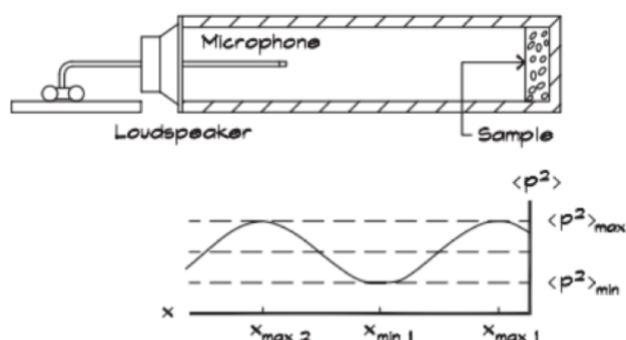
#### 2.1.3.1 Tubo de impedância

Conhecido também como método do tubo de ondas estacionárias, o tubo de impedância pode ser usado para determinar o coeficiente de absorção sonora de incidência normal (ISO 10534-1, 1996; ISO 10534-2, 1998).

É construído a partir de um tubo de seção transversal circular com paredes rígidas, no qual o material a ser analisado é colocado de um lado do tubo enquanto na outra extremidade está uma fonte emissora sonora.

O método consiste na medição das variações das pressões máximas e mínimas dentro de um tubo construído de acordo com as orientações normativas, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Tubo de Impedância ou de Ondas Estacionárias



Fonte: Long (2014).

Esse método é particularmente útil para comparar pequenas amostras de materiais durante o desenvolvimento de um produto ou no controle de qualidade. Também pode ser usado como base de conhecimento para utilizações em extremidades de cavidades longas no espectro de baixa frequência (HOPKINS, 2007).

#### 2.1.3.2 O software *i-Simpa*

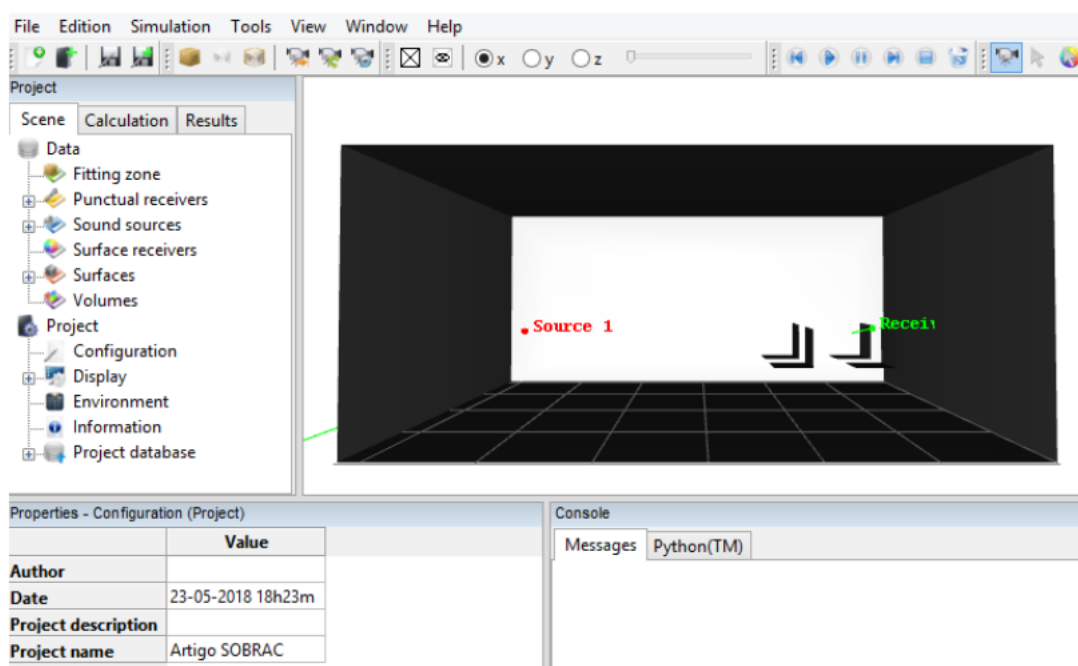
A modelagem para a simulação acústica de salas em modelos tridimensionais tem sido muito estudada. Bassuet *et al.* (2014) estudaram a relevância dessas ferramentas como suporte para a busca de soluções para salas de arquitetura complexa. Eles concluíram que essas ferramentas entregam um resultado acústico mais intuitivo e interativo, dando habilidade de moldar os espaços com um entendimento do comportamento integral do comportamento sonoro. Já Christensen (2013) comparou medições com simulações, reforçando a importância das duas frentes de pesquisa para um estudo de acústica de salas aprofundado.

O software *i-Simpa* foi desenvolvido no Instituto Francês de Ciência e Tecnologia para Transporte, sendo voltado para todos os profissionais, estudantes ou interessados na área de acústica de salas. Ele é um software de simulação acústica geométrica que utiliza dois tipos de códigos, o TCR, que significa "*Theorie Classique de la Reverberation*", que é baseado na teoria clássica da reverberação e o código SPPS, "*Simulation de la Propagation de Particules Sonores*", sendo esse de traçado de raios, baseado em abordagens geométricas, energéticas e probabilísticas.

A simulação é dividida em 3 etapas: *Scene*, que é destinada a editar e simular o ambiente; *calculation*, para editar propriedades dos cálculos; e *results*, onde os

resultados são mostrados. Entre os parâmetros acústicos que podem ser calculados pelo software estão: Tempo de reverberação, clareza, definição, suporte Inicial, tempo de decaimento inicial, tempo central, nível de pressão sonora e suporte inicial (GAUDEOSO *et al.*, 2018). Na Figura 6 é possível observar a interface inicial do programa i-Simpa.

**Figura 6 - Interface Inicial do Software i-Simpa**



**Fonte: Gaudeoso (2018).**

## 2.1.4 Soluções Acústicas

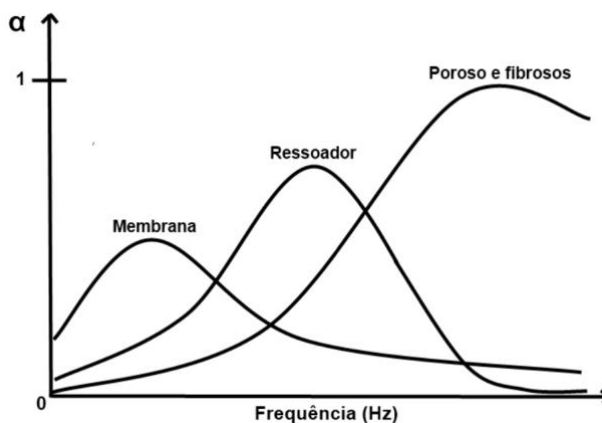
Um bom projeto acústico arquitetônico requer o volume correto da sala, uma forma adequada da sala e tratamentos de superfície, utilizando uma combinação adequada e colocação de absorvedores, difusores e superfícies planas (COX e D'ANTONIO, 2017)

### 2.1.4.1 Absorvedores

Materiais absorvedores podem ser separados em três categorias distintas conforme suas características, sendo elas: porosos, ressoadores e fibrosos. Cada um

possui um comportamento quanto à absorção em determinada frequência conforme a Figura 7 (SILVA, 2013).

**Figura 7 - Gráfico absorção dos materiais em diferentes frequências**



Fonte: Silva (2013).

Os materiais porosos e fibrosos possuem melhor absorção sonora nas altas frequências, e como exemplos desses materiais temos os tecidos, as mantas, as fibras minerais, os aglomerados de fibra de madeira e cortiça além dos materiais plásticos.

Os ressoadores possuem altas absorções a médias frequências. Os materiais perfurados são exemplos dentro dessa categoria. Já as membranas são sistemas criados para atuar em baixas frequências (SILVA, 2013).

#### 2.1.4.2 Esquadrias acústicas

Atualmente diversas fábricas de esquadrias possuem em seu portfólio janelas e portas acústicas. Essas geralmente são fabricadas com vitragem dupla e uma estrutura robusta, com uma vedação excelente. Também é importante que a instalação seja feita por pessoal especializado, para que a redução de ruído realmente seja eficiente. Essas esquadrias, além de reduzirem o ruído, também acabam sendo eficientes para bloqueio de temperaturas altas ou baixas, vento e infiltração de água nas paredes (SILENCE, 2020).

Os preços de uma esquadria, como portas janelas ou até fechamentos em vidros com isolamento acústico, na cidade de São Paulo, giram em torno de 152 a 286



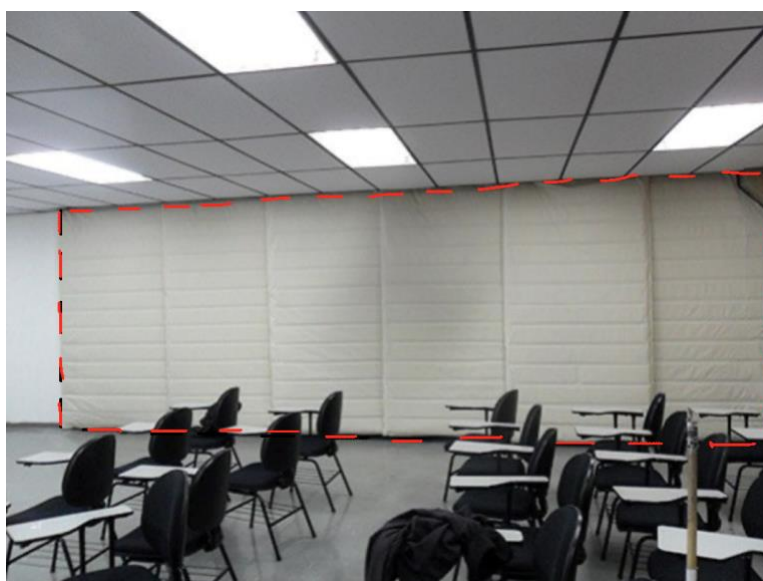
dólares por metro quadrado (cotação do dólar R\$5,24 no dia 07/07/2021) (PROTESSOM, 2020).

#### 2.1.4.3 Cortinas acústicas

Já existem no mercado diversos modelos de cortinas com função específica de barreira acústica de ruídos. Os fornecedores também alegam que elas funcionam como bons isolantes térmicos para as janelas. Alguns modelos prometem apenas uma atenuação do ruído externo, enquanto outros prometem até 60% de redução do ruído (PROACÚSTICA, 2020).

Na Figura 8 está um exemplo de uma dessas cortinas acústicas aplicadas em uma sala de aula.

**Figura 8 - Cortina acústica instalada em sala de aula**



**Fonte: Proacústica (2020).**

Na Figura 8, ao fundo, em tracejado, é possível observar uma cortina acústica. Quando fechada, como na imagem, atua também como um *blackout*.

## 2.2 MATERIAIS ABSORVEDORES

### 2.2.1 Polímeros

Polímeros, do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Polímero é uma macromolécula composta por muitas dezenas de milhares de unidades de repetição, ligadas geralmente por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de polímeros é o monômero. Dependendo do tipo, do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação, esses materiais também podem ser divididos e classificados de diversas formas, por critérios como origem, estrutura química e comportamento mecânico. Além de serem divididos entre os naturais e os sintéticos (CANEVAROLO JUNIOR, 2013).

Todo polímero é uma macromolécula mas nem toda macromolécula é considerada um polímero. Os seres vivos possuem diversos polímeros naturais em sua constituição, como os carboidratos, as proteínas e os ácidos nucleicos que formam o DNA e o RNA. Quando se fala de polímeros, refere-se a compostos químicos formados por polimerização e constituídos essencialmente por unidades estruturais repetidas. No entanto, a primeira coisa que se relaciona ou que a maior parte das pessoas associa aos polímeros é a palavra plástico. Entretanto, plástico é apenas uma categoria de polímeros, que podem ser moldados e cuja composição inclui principalmente derivados de celulose, proteínas e resinas (FLORES, 2009).

O desenvolvimento científico gerou, até o momento, um grande número de polímeros para atender as mais diversas aplicações. Assim, é possível listar uma série deles agrupados de acordo com uma determinada ordem. Também, existem diversas possíveis classificações para os polímeros (CANEVAROLO JUNIOR, 2013). Neste trabalho, foram brevemente abordadas duas diferentes classificações usuais: quanto à estrutura química e quanto ao seu comportamento mecânico.

#### 2.2.1.1 Quanto ao comportamento mecânico

A classificação dos polímeros quanto ao comportamento mecânico é a mais usual. De acordo com esta classificação, os polímeros se dividem entre plásticos,

elastômeros e fibras, sendo que o primeiro também possui outras subdivisões. Para facilitar a visualização e compreensão, essa classificação está resumida no Quadro 1.

**Quadro 1 - Classificação polímeros quanto ao comportamento mecânico**

		<b>Características</b>	<b>Exemplos</b>
<b>PLÁSTICOS</b>	<b>Termoplásticos</b>	Com aumento da temperatura e pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados. Retirada a solitação se solidificam adquirindo a forma do molde. Novas aplicações de temperatura e pressão reiniciam o processo, sendo <u>recicláveis</u> . Também são <u>solúveis</u> e possuem cadeia linear ou ramificada.	PE, PP, PVC.
	<b>Termorígidos</b>	Termofixos ou termoendurecidos, adquirem a forma do molde e se solidificam. Porém, subsequentes aumentos de temperatura e pressão não têm mais influência, sendo materiais <u>insolúveis</u> , <u>infusíveis</u> e <u>não recicláveis</u> . Sendo moldados ainda na forma de pré-polímero.	Resina de fenol-formaldeído (baquelite), epóxi (araldite).
	<b>Barroplásticos</b>	São plásticos que, com um aumento substancial da pressão e marginal da temperatura, fluem através de rearranjos em sua conformação. Seu estado físico deve ser borrachoso.	EVA, TPE, TPU.
<b>ELASTÔMEROS</b>		Polímeros que, à temperatura ambiente podem deformar-se pelo menos duas vezes o seu comprimento inicial, retomando ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço. Para apresentar estas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas uma as outras, com uma baixa densidade de ligação cruzada.	Borracha natural, borracha sintética.
<b>FIBRAS</b>		É o material termoplástico orientado, sendo que o sentido longitudinal dito "eixo principal" da fibra satisfaz a condição geométrica de $L/D \geq 100$ . A orientação das cadeias e dos cristais, feita de modo forçado durante a fiação, aumenta a resistência mecânica dessa classe de materiais, tomando-os possíveis de serem usados na forma de fios.	Náilons, poliéster (PET).

Fonte: Adaptado de Canevarolo Junior (2013)

Neste trabalho serão utilizados materiais fibrosos, como náilon e poliéster, como é possível observar no Quadro 1, mas também materiais termoplásticos, como o PVC.

### 2.2.1.2 Quanto à estrutura química

Para essa classificação, analisa-se o polímero através da estrutura química do seu mero. De acordo com Canevarolo Junior (2013), duas subdivisões são possíveis: polímeros de cadeia carbônica e polímeros de cadeia heterogênea. No caso de polímeros de cadeia carbônica, os mais usuais são: os polímeros de dienos, conhecidos popularmente como neoprene, borracha natural e borracha níttrica. Os polímeros clorados, sendo que o mais comum é o policloreto de vinila (PVC), o segundo termoplástico mais consumido no mundo. E por fim, os polivinil ésteres, cujo exemplo mais usual é o poliacetato de vinila (PVA), sendo mais comumente utilizado em tintas e cápsulas de medicamentos.

Já na divisão de polímeros de cadeia heterogênea, a cadeia principal possui, além do carbono, outro átomo, conhecido por heteroátomo, cujos exemplos são o oxigênio, nitrogênio, enxofre, silício, etc. Os mais importantes para esta pesquisa são: o poliéster, que é a classe mais versátil de polímero, com um crescimento nas mais diversas aplicações; e as poliamidas, que são mais conhecidas popularmente como náilon (KLEIN, 2009; CANEVAROLO JUNIOR, 2013). Mais detalhes sobre os polímeros e suas aplicações estão no Apêndice A.

### 2.2.2 Têxteis

O indício mais antigo da existência de têxteis encontrado no leste Europeu data de mais de 24 mil anos. Esses indícios indicam a presença de tecelagem no Período Paleolítico (cerca de 10.000 a.C.). Neste período o principal uso dos têxteis era cobrir o corpo para controlar o frio (PEZZOLO, 2007).

As fibras vegetais mais antigas são o algodão e o linho, que datam de aproximadamente 3.000 a 5.000 a. C. Ambas utilizadas para confecção de diversos tipos de produtos. Com a chegada da era industrial, o mercado foi se tornando mais competitivo, de forma que o desenvolvimento de novos materiais se fez necessário, assim como a diversificação da matéria-prima (PEZZOLO, 2007). Então surgiram as fibras artificiais, as quais tiveram sua primeira aparição há mais de um século, quando Chardonnet criou a seda artificial. Posteriormente, em 1935, Dr. Carothers da *Du Pont*

*Company* produziu pela primeira vez o náilon, que foi uma inovação para a época (HONGU e PHILIPS, 1997).

Somente ao longo dos últimos cinquenta anos, fibras naturais foram sendo efetivamente substituídas por fibras artificiais como o acrílico, náilon, poliéster e polipropileno. O sucesso dos produtos sintéticos se deu principalmente devido ao custo. Além disso, ao contrário das fibras naturais colhidas pelos agricultores, as fibras sintéticas podem ser produzidas em larga escala e facilmente personalizadas para aplicações específicas (GUIMARÃES, 2014).

O consumo mundial de fibras têxteis cresceu em média 3,5% ao ano entre 1990 a 2011, passando de 40 para 82 milhões de toneladas. O aumento populacional foi de 1,3% ao ano, o que mostra que o consumo per capita passou de 7,6 kg/hab. em 1990 para 11,8 kg/hab. em 2011 (IEMI, 2011). O consumo de fibras químicas também superou significativamente as de origem natural nesse intervalo de tempo, e essa tendência de maior consumo de fibras sintéticas deve persistir nos próximos anos, sendo desfavorável ao Brasil, que é bastante competitivo no setor de produtos de algodão (ETENE, 2014; IEMI, 2011).

A indústria têxtil no Brasil representa 16,7% dos empregos e 5,7% do faturamento da indústria de transformação, sendo o segundo maior empregador da indústria da transformação, perdendo apenas para a indústria de alimentos e bebidas juntas. O Brasil é o quarto maior produtor de jeans e malhas do mundo, possui também a maior cadeia têxtil completa do ocidente, sendo a única que possui desde a produção de fibras e plantação de algodão até fiações, tecelagem, confecções, desfiles de moda e varejo. A China é a principal origem das importações de produtos têxteis e confeccionados para o Brasil, sendo um terço dessas importações composto por tecidos (ABIT, 2020a).

Dados da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2011) estimam que a produção de uma tonelada de fibras de juta requer apenas 10% da energia utilizada para a produção de uma tonelada de fibras sintéticas. Não obstante, cresce a conscientização ambiental a respeito do uso de têxteis sintéticos, e surge a necessidade de estimular a busca por processos menos poluentes e mais eficazes.

Sendo assim, apesar de o mercado de fibras naturais oscilar mediante a concorrência com as fibras sintéticas, a indústria e os consumidores atualmente tendem a buscar alternativas com recursos renováveis. É preciso analisar cada

situação de uso do material para decidir qual é a melhor escolha no quesito durabilidade, custo e desempenho.

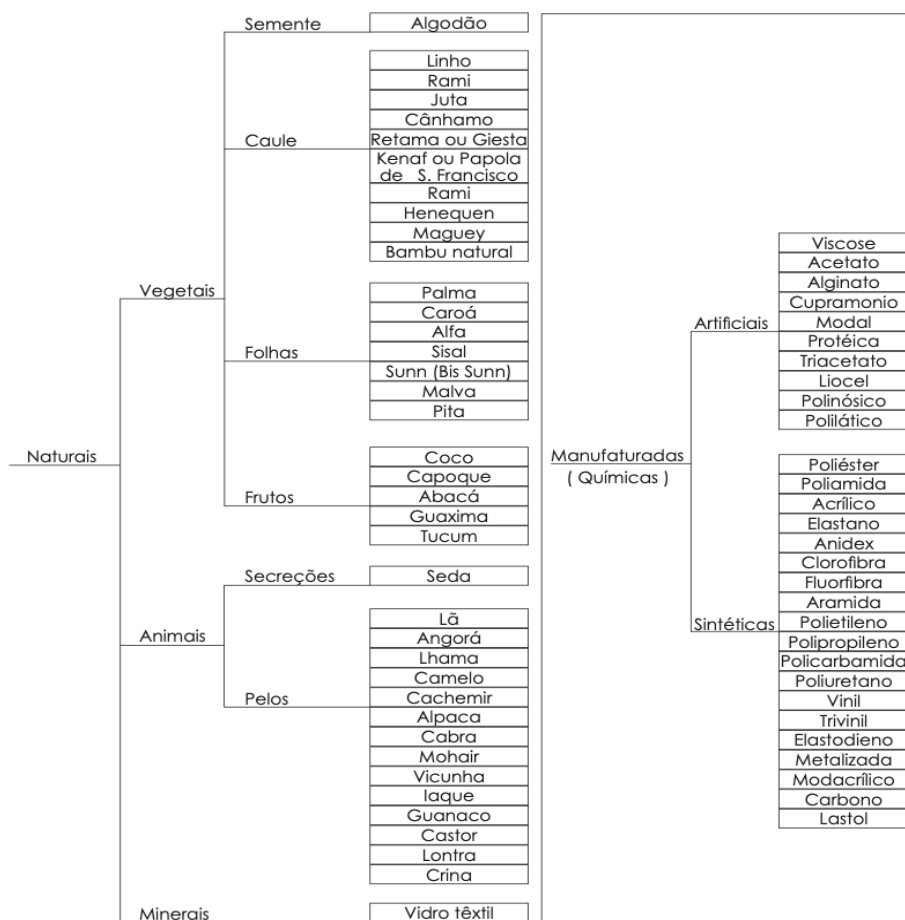
#### 2.2.2.1 Fibras

Existem propriedades que influenciam na qualidade e durabilidade do produto, desde o aspecto, que pode ser muito afetado pelo desgaste, pelo desbotamento, ou formação de bolinhas de fibras. O tipo de fibra é um dos fatores que podem implicar nessas qualidades. Há fibras que são ótimas para cortinas, mas em estofados não são duráveis ou confortáveis. E fibras que são ótimas para estofados, porém não são adequadas para cortinas (ABIT, 2011b).

Entende-se por fibra têxtil qualquer substância, natural ou química, que possua um comprimento muito superior à espessura, com características adequadas para a fiação e posterior tecelagem, como flexibilidade e finura (ARAÚJO e CASTRO, 1984).

Quanto à origem, as fibras se dividem em dois grandes grupos, as fibras naturais e as químicas (ou manufaturadas). As fibras naturais podem ser de origem vegetal, animal ou mineral. Já as fibras manufaturadas podem ser sintéticas ou artificiais (PEZZOLO, 2007). Na Figura 9 estão esquematizadas as classificações e exemplos de fibras.

**Figura 9 - Esquema Tipos de Fibras e Exemplos**



Fonte: Sinditêxtil (2009)

Várias fibras sintéticas foram desenvolvidas especificamente para substituir as fibras naturais, com tamanho mais uniforme e custando menos. As mais comuns são o náilon 6, o náilon 66, os poliésteres saturados, o polipropileno, as elastoméricas e as acrílicas. Porém nenhuma fibra isoladamente, seja química ou natural, preenche todas as necessidades da indústria (SILVA, 2012).

#### 2.2.2.1.1 Fibras Naturais

Entre as fibras naturais, as mais populares são o algodão, o linho e a lã. O algodão é uma fibra mais empregada mundialmente e sua popularidade se deve ao fato de ser confortável, leve e macio ao toque, resistente a lavagens e de fácil tingimento. O linho, por ser derivado de uma planta herbácea e não ter mistura de fibras em sua composição é considerado um tecido nobre, bastante resistente e

durável. (FCEM, 2020). A lã é um ótimo isolante térmico, sendo também uma fibra bastante elástica e não inflamável (AMARILHO-SILVEIRA, 2015).

Dentre as fibras naturais, a fibra do algodão é a mais importante, pois representa, aproximadamente, 50% da produção mundial anual de fibras. Já as fibras de origem animal são responsáveis por 6% da produção mundial, dentre as quais a lã é a mais importante. Há também as finíssimas fibras produzidas pelo bicho-da-seda. Com exceção da seda, as fibras naturais são relativamente curtas, em média, entre dois e 5 centímetros de comprimento (ABIT, 2011b; SILVA, 2012)

#### *2.2.2.1.2 Fibras Manufaturadas*

As fibras químicas são fibras obtidas através de artifícios ou sínteses químicas e podem ser divididas entre as artificiais e as sintéticas. As fibras artificiais são as obtidas a partir de paste de celulose. Já as sintéticas, na sua grande maioria, têm origem na indústria petroquímica (KUASNE, 2008).

#### *2.2.2.1.3 Fibras artificiais*

As fibras químicas artificiais podem ter origem da transformação de substâncias naturais ou da sua solubilidade por meio de agentes químicos. Essas fibras podem ser derivadas da celulose de plantas ou de proteínas de animais. Os primeiros registros desse tipo de fibra devem-se ao químico Christian Friedrich Schönbein, quando conseguiu obter filamentos colocando o algodão num banho de ácido nítrico e clorídrico. No entanto, as fibras geradas desta forma, eram altamente inflamáveis (SILVA, 2012).

As fibras artificiais foram introduzidas no Brasil quase simultaneamente ao seu aparecimento no exterior. As empresas nacionais e estrangeiras que se dedicaram à produção desse tipo de fibra tiveram um rápido crescimento, favorecidas pela abundância de matéria prima, mão-de-obra barata, e pelo baixo custo da energia elétrica. A produção em escala comercial começou em 1931, pela Companhia Brasileira Rhodiaceta, atual Rhodia, com o filamento têxtil de acetato. As fibras mais comuns dessa categoria são a viscose, o acetato, modal e liocel (ABIT, 2011).



#### 2.2.2.1.4 *Fibras sintéticas*

Dentro das fibras químicas sintéticas ainda é possível mais duas divisões: as fibras orgânicas (derivadas do petróleo) e as inorgânicas (CT, 2020).

A qualidade das fibras sintéticas fabricadas no Brasil é comparável às observadas no mercado internacional. Neste segmento existe um grande controle de qualidade e rigor nas especificações técnicas. A qualidade também provém da atualização das empresas em tecnologia de processo, sendo um importante fator de competitividade deste segmento (SILVA, 2012). Ainda nesta divisão de fibras sintéticas destaca-se o poliéster, um polímero termoplástico utilizado cada vez mais pelo setor, que pode ser proveniente da reciclagem das garrafas de plástico ou de matéria-prima virgem (BASTIAN, 2009).

O poliéster é hoje a fibra sintética de maior consumo no setor têxtil, representa pouco mais de 50% da demanda total de fibras químicas, podendo ser utilizada pura ou em misturas com algodão, viscose, náilon, linho ou lã, em proporções variadas. Entre todas as fibras têxteis, sejam químicas ou naturais, é a com menor custo (ROMERO, 1995).

Entre as vantagens da fibra de poliéster, está a elevada resistência à umidade e aos agentes químicos além de não se inflamar com facilidade. É antialérgica e possui grande resistência à tração. A adição de apenas 10% dessa fibra ao algodão resulta em um aumento de 8% na resistência do fio, permitindo um significativo acréscimo na velocidade do processo têxtil, o que significa maior produtividade e menor custo (ROMERO, 1995; ARAUJO e CASTRO, 1984).

Já a poliamida foi a primeira fibra sintética a ser produzida industrialmente, e é popularmente conhecida como náilon. Entre outras qualidades, apresenta elevada resistência mecânica (cerca de 3,5 vezes superior ao algodão), o que a torna adequada para a fabricação de dispositivos de segurança como cintos de segurança. Outras características são a sua baixa absorção de umidade, a possibilidade de texturização e a boa aceitação de acabamentos têxteis. (ROMERO, 1995).

Embora a fibra acrílica seja a fibra menos consumida entre as fibras químicas, ela é considerada a melhor substituta da lã. É um produto quente, bom isolante térmico, leve, resistente à ação dos raios solares, raios ultravioletas, e agentes químicos. Possui larga aplicação na fabricação de artigos de inverno como agasalhos, meias, gorros, cobertores, enfim, tecidos felpudos em geral (ROMERO, 1995).

A função da fibra de elastano é conferir elasticidade aos tecidos convencionais, o que permite confeccionar peças de vestuário que aderem ao corpo, ajustando-se a forma do corpo sem prejudicar movimentos. Essa característica torna esse tipo de fibra muito apropriada para a confecção de peças de praia, esportivas, femininas, íntimas, meias, e outras aplicações médicas e estéticas. Essas fibras podem chegar a até cinco vezes o seu tamanho original sem se romper, e sua utilização em combinação com outras fibras é na ordem de 5 a 20% (ROMERO, 1995).

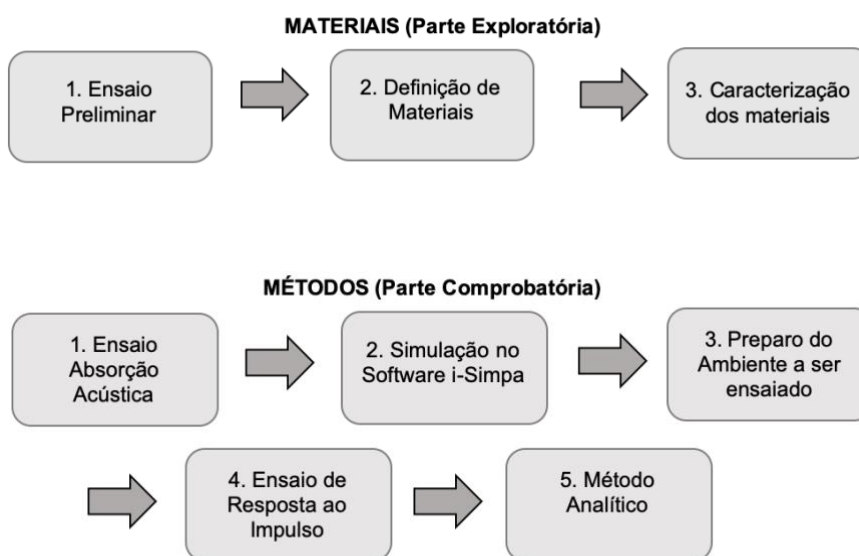
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta as etapas de pesquisa, como foram realizadas, seus métodos, procedimentos e materiais utilizados. Descreve as ações e procedimentos tomados para atingir os objetivos definidos, bem como os organiza de forma sistemática.

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para facilitar a visualização e entendimento, essa pesquisa foi dividida em duas partes: materiais e métodos. Essas partes estão também divididas em etapas, conforme Figura 10.

**Figura 10 – Fluxograma Materiais e Métodos**



**Fonte: Autora (2021)**

No fluxograma disposto na Figura 10, a pesquisa está dividida entre a parte inicial, que é a exploratória, e a segunda parte, os métodos, parte comprobatória.

#### 3.2 MATERIAIS

Antes de iniciar a tomada de amostras, é preciso escolher o método de amostragem baseado em fatores relacionados à confiança, exatidão, custo e facilidade de operação do método. Assim sendo, decidiu-se realizar um ensaio

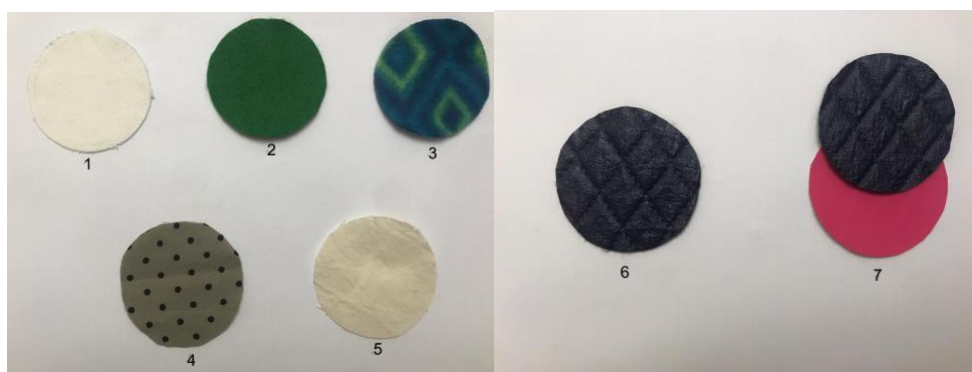
preliminar para definir quais seriam os materiais a serem estudados. Após essa etapa, os materiais foram escolhidos e caracterizados por métodos e procedimentos descritos na sequência.

### 3.2.1 Etapa 1 – Ensaio Preliminar

A primeira etapa da pesquisa foi o ensaio preliminar. Essa etapa foi feita no tubo de impedância, situado no bloco da engenharia mecânica da UTFPR, para obtenção dos coeficientes de absorção de alguns materiais mais populares e facilmente encontrados no comércio local, com o intuito de verificar o comportamento dessa pequena amostra de materiais e definir a melhor gama de têxteis e plásticos, de acordo com algumas características e resultados, e também possíveis combinações entre eles para posteriormente realizar uma análise robusta.

Os materiais analisados nessa etapa preliminar foram divididos entre duas categorias. Tecidos e *blackouts*. Os tecidos utilizados possuem os seguintes nomes populares: jeans (malha de algodão), tricoline (algodão), algodão cru, feltro e soft. Os *blackouts* analisados são popularmente conhecidos como: courino e Bagum. Na Figura 11 estão dispostos os tecidos e *blackouts* analisados na seguinte ordem: 1. Jeans 2. Feltro 3. Soft 4. Tricoline 5. Algodão cru 6. Courino 7. Combinação Courino e Bagum.

**Figura 11 – Amostras dos materiais ensaiados**



Fonte: Autora (2021)

Os *blackouts*, para serem estruturados e terem facilitada e ampliada sua utilização, são compostos de mais de uma camada de material. Geralmente são

formados de uma camada de tecido, malha ou manta, sobreposta a um filme plástico, que geralmente é o PVC, mas também pode ser outro polímero. Na Figura 12 é possível observar imagens da frente e do verso dos *blackouts* utilizados no ensaio preliminar.

**Figura 12 – Amostras *Blackouts***



Fonte: Autora (2021)

No Quadro 2 estão os dados fornecidos pelo fabricante de cada uma das partes dos *blackouts* utilizados nessa etapa.

**Quadro 2 - Blackouts Utilizados no Ensaio Preliminar**

Nome Popular	Composição		Espessura	Densidade
	Filme	Manta		
Bagum	45% Resina de PVC, 30% Carbonato de Cálcio, 20% DOP plastificante	Malha de poliéster	0,3/0,4mm	350g/m <sup>2</sup>
Courino	PVC	Feltro 120g	Aprox. 0,73mm	350g/m <sup>2</sup>

Fonte: Autora (2021)

A composição e outros dados fornecidos pelos fabricantes dos tecidos utilizados na pesquisa estão dispostos no Quadro 3.

**Quadro 3 - Tecidos Utilizados Ensaio Preliminar**

<b>Nome Popular</b>	<b>Composição</b>	<b>Gramatura</b>
Jeans	100% Algodão	150 g/m <sup>2</sup>
Tricoline	100% Algodão	120 g/m <sup>2</sup>
Algodão Cru	100% Algodão	138 g/m <sup>2</sup>
Feltro	100% Poliéster	190 g/m <sup>2</sup>
Soft	100% Poliéster	280 g/m <sup>2</sup>

**Fonte: Autora (2021)**

Para cada amostra foram realizados três ensaios, para caso se observasse alguma variação entre eles, porém essa variação foi mínima. Os resultados desse ensaio estão no Capítulo 4.

Para os ensaios finais, foram escolhidos tecidos que possuam as características dos materiais com melhor resultado no ensaio preliminar (alta densidade e alta porosidade), além de outros comumente empregados como cortinas. O courino utilizado no ensaio também apresentou um bom resultado, principalmente quando combinado com o Bagum, atingindo os melhores valores de absorção para altas frequências. Isso provavelmente ocorreu porque o produto é composto de diferentes camadas, além de possuir efeito matelassê (um tipo de textura que imita costura). É provável que esse efeito auxilie na obtenção de melhor resultado, pois sabe-se que materiais rugosos possuem absorção acústica maior que materiais lisos.

### 3.2.2 Etapa 2 – Definição dos Materiais

Para definição dos tecidos a serem ensaiados levou-se em consideração características como porosidade, densidade, custo e disponibilidade. Assim, baseado em estudos disponíveis na literatura, realizou-se pré-seleção para o ensaio preliminar, para na sequência aprofundar a pesquisa nos materiais que obtiveram melhor desempenho.

Como foi possível observar no ensaio preliminar, materiais porosos e com maior número de camadas auxiliam na absorção. Por isso, decidiu-se utilizar um material de baixo custo e facilmente encontrado no mercado local apenas como camada de recheio, para melhorar a absorção. O material escolhido foi o Náilon Dublado, que consiste em um material com uma camada de sintético em náilon e uma

fina camada de espuma. Esse material será testado isoladamente e apenas como recheio para não prejudicar a estética da cortina.

Com base no ensaio preliminar, os materiais têxteis escolhidos para teste foram:

- Náilon Dublado (A), isolado e na função de recheio;
- Soft (I), pelo seu bom resultado no ensaio preliminar, baixo custo, fácil acesso e semelhança com a lã;
- Microsoft (J), pela semelhança com o soft.
- Jacquar matelassê (H), por conta da textura em matelassê e possuir camadas;
- Manta Flanelada (K), por ser o tecido mais poroso encontrado na faixa de preço dos demais
  - Os *blackouts* utilizados foram:
- Gabardine (G), apesar de ser um tecido sintético, é mais comumente utilizado como cortina blackout.
- Courino do matelassê (B), semelhante ao utilizado no ensaio preliminar;
- Bagum (E), utilizado no ensaio preliminar;
- Náilon 70 (D), por sua semelhança com o Bagum;
- Courino do tipo liso (C).

### 3.2.3 Etapa 3 – Caracterização dos Materiais

Apesar da maioria dos fabricantes fornecerem diversos dados, foram realizados ensaios para confirmação, e também para melhor caracterizar esses materiais. Um resumo dos materiais utilizados e sua composição se encontra no Quadro 4 e no Quadro 5.

**Quadro 4 - Tecidos Utilizados Ensaio Preliminar**

<b>Símbolo</b>	<b>Nome Popular</b>	<b>Composição</b>
G	Gabarbine	100% Poliéster
H	Jacquar Matelassê	100% Poliéster
I	Soft	100% Poliéster
J	Microsoft	100% Poliéster
K	Manta flanelada	100% Poliéster

Fonte: Autora (2021)

**Quadro 5 - Blackouts Utilizados Ensaio Preliminar**

<b>Símbolo</b>	<b>Nome Popular</b>	<b>Composição</b>
A	Náilon Dublado	Poliéster e náilon
B	Courino Matelassê	Poliéster e PVC
C	Courino liso	Poliéster e PVC
D	Náilon 70	PVC e náilon
E	Bagun	Poliéster e PVC

Fonte: Autora (2021)

### 3.2.3.1 Ensaio de densidade

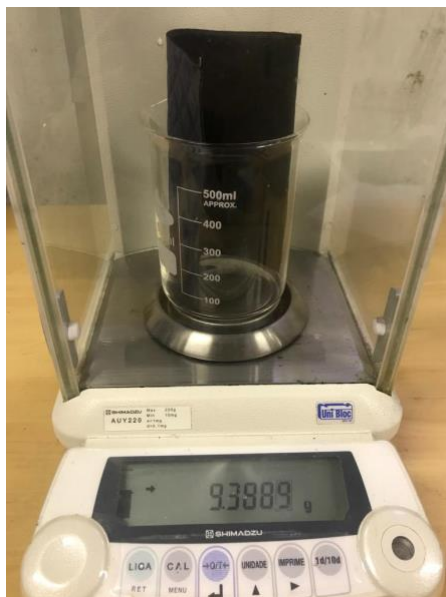
Apesar de alguns materiais terem sua densidade fornecida pelo fabricante, foram feitos ensaios para apurar as reais densidades dos materiais. Esse ensaio é normatizado no Brasil pela norma ABNT 10591 - Materiais têxteis - Determinação da Gramatura de Superfícies Têxteis (2008), a qual descreve a metodologia para a determinação da gramatura de malhas e tecidos planos. Também existe a norma europeia para calcular a densidade de têxteis, que é a ISO EN 12127: *Textiles*. (1998) e a norma americana, ASTM D3776/D3776M (2009) – *Standard tests methods for mass per unit área of fabric*, ambas semelhantes a brasileira. Neste trabalho para o cálculo das densidades dos materiais têxteis será utilizada a norma brasileira ABNT 10592 (2008).

Conforme descreve a norma, foram separadas 5 amostras de (15 x 15) cm dos materiais e foi utilizada uma balança com precisão de 0,001g. As amostras foram retiradas de modo que fossem cortados fios de trama distintos e armazenadas



conforme a norma NBR ISSO 139:2008. Na Figura 13 está disposta uma imagem do processo de pesagem.

**Figura 13 – Pesagem das amostras**



**Fonte: Autora (2021)**

Foi utilizada balança analítica do modelo Shimadzu ATX224. De acordo com a NBR 10591, foi feita a média das massas obtidas, para ser dividida pela área em questão. A densidade padrão dos têxteis é dada em  $\text{g/m}^2$ . As densidades obtidas estão no Quadro 6.

**Quadro 6 – Densidades e Espessuras dos Materiais**

Têxteis	Gramatura ( $\text{g/m}^2$ )	Espessura (mm)	Densidade ( $\text{g/m}^3$ )
<b>A</b>	91,75	3	30,58
<b>B</b>	423,79	0,7	605,42
<b>C</b>	327,32	0,7	467,61
<b>D</b>	293,46	0,3	978,21
<b>E</b>	416,26	0,4	1040,67
<b>G</b>	254,86	4,5	56,63
<b>H</b>	209,65	2	104,82
<b>I</b>	201,86	1,5	134,58
<b>J</b>	282,94	2	141,47
<b>K</b>	208,92	1	208,92

**Fonte: Autora (2021).**

A densidade padrão de materiais têxteis é dada em  $\text{g/m}^2$ , mas para facilitar a comparação de dados com outros trabalhos e também com outros materiais foi calculada a densidade do material em  $\text{g/m}^3$ . Para isso, foi realizada a medição da espessura dos materiais com o auxílio de um paquímetro para posterior cálculo da densidade padrão. Os valores das espessuras e das respectivas densidades encontram-se no Quadro 6.

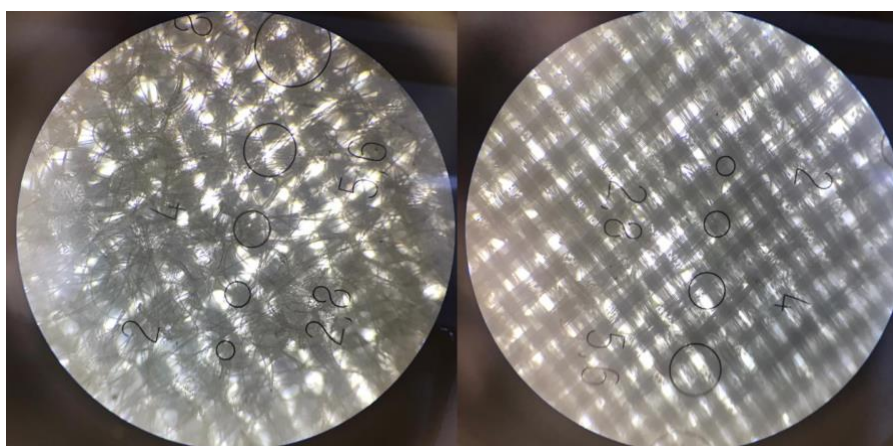
### 3.2.3.2 Fotografias Microscópicas

Após os ensaios de caracterização, foram realizadas fotos microscópicas de cada material utilizado no ensaio, para dessa forma, haver registro preciso do formato das tramas e dos poros e facilitar a futura comparação com outros trabalhos com tecidos. Essa etapa foi realizada no Laboratório de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Para as fotos foi utilizado um microscópio Bioptika modelo B20, ajustado em 100X de aumento e uma câmera simples.

Na Figura 14 está disposto o material A (Náilon Dublado) observado de ambos os lados, à esquerda o lado de espuma e à direita o lado de trama de náilon. É possível observar que os poros e tramas seguem um padrão, mesmo no lado da espuma. Foi utilizado uma lâmina com marcações para referencia do tamanho dos poros. O material A, de acordo com a lâmina utilizada, possui vários poros de 0,02cm de diâmetro.

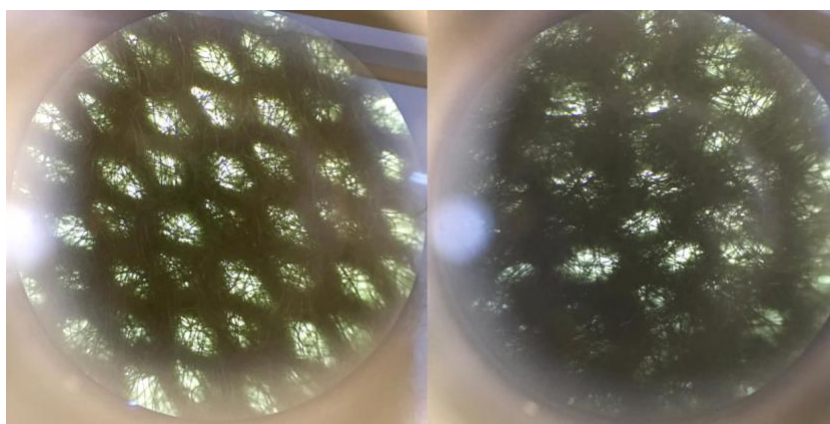
**Figura 14 – Microscópio Material A - Náilon Dublado**



Fonte: Autora (2021)

Na Figura 15 está disposto o material I, popularmente conhecido como *Soft*, observado de ambos os lados. Como o material é um tecido, na imagem à esquerda é seu lado direito e à direita, o avesso. Também é possível observar, apesar das diferenças, que os poros e tramas seguem um padrão, em ambos os lados. Apesar de não aparecer na imagem, foi possível observar o tamanho dos poros, que são em formato oval, com largura entre 0,03 e 0,04cm.

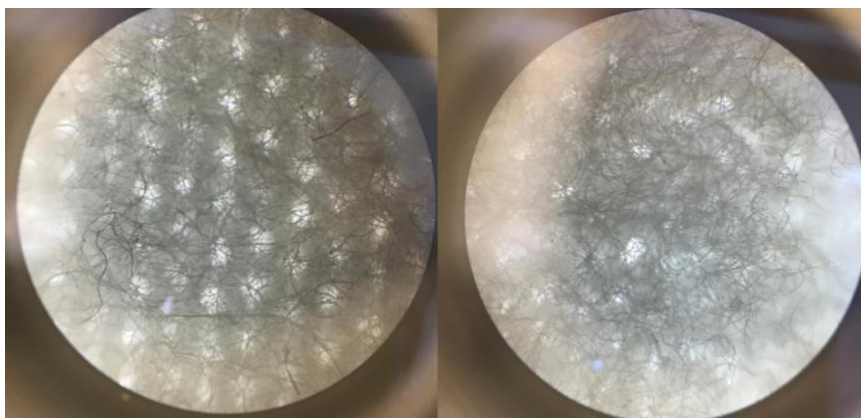
Figura 15 – Microscópio Material I - *Soft*



Fonte: Autora (2021)

Já na Figura 16 está disposto o material J. Também nesta imagem, no lado esquerdo temos um lado do tecido e no direito o outro. Por meio da observação microscópica, é possível observar uma certa semelhança com o tecido I, por isso a semelhança de nomes. O tecido J é uma versão com poros menores do tecido I, por isso seu nome popular é *Microsoft*. Também não é possível ver na foto, mas o tamanho aproximado de seus poros é 0,02cm.

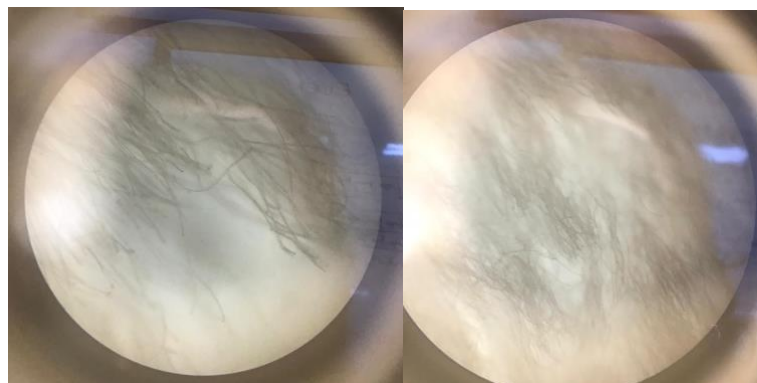
**Figura 16 – Microscópio Material J - *Microsoft***



**Fonte: Autora (2021)**

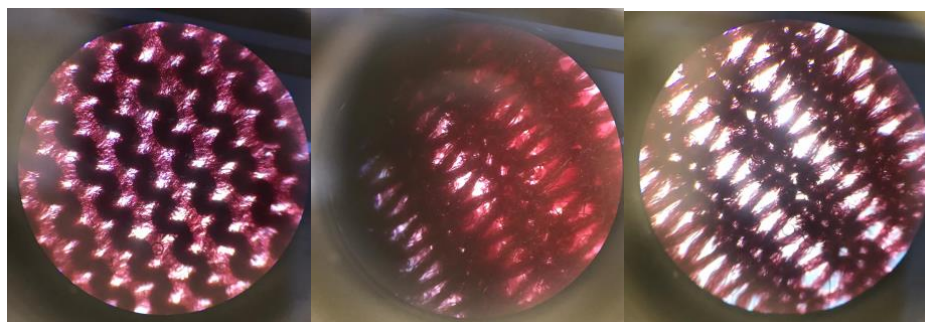
Os demais materiais são bloqueadores de luz, o que dificultou sua visualização. O material K (Manta Flanelada) foi possível apenas observar, sem conseguir ver sua trama, por conta de seus fios densos (Figura 17), e o material H (*Jacquar Matelassê*) precisou ser separado em 3 camadas para ser observado (Figura18).

**Figura 17 – Microscópio Material K – Manta Fanelada**



**Fonte: Autora (2021)**

**Figura 18 – Microscópio Material H – Jacquar Matelassê**



Fonte: Autora (2021)

Nos demais materiais, tecido G (Gabardine) e todos os *blackouts*, não foi possível fazer observação microscópica, porém as fotos de todos os materiais estão disponíveis no Item 3.2.3.3.

### 3.2.3.3 Fotografias dos Materiais

Como alguns materiais são opacos, não foi possível fazer fotografia microscópica, porém na fotografia comum é possível ver a trama de alguns deles. Na Figura 19 está disposto o Náilon Dublado (material A), à direita a trama de náilon e à esquerda a espuma.

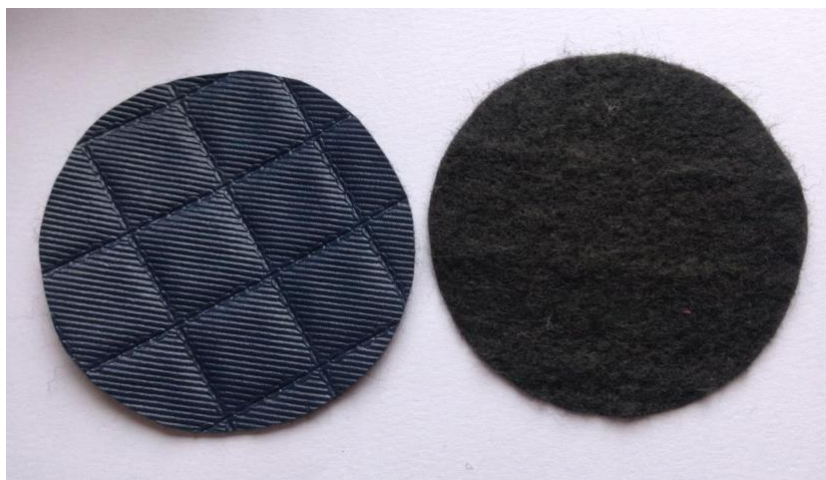
**Figura 19 – Material A - Náilon Dublado**



Fonte: Autora (2021)

Na Figura 20 está disposto o Courino Matelassê (material B), à esquerda o lado direito, com o matelassê de PVC e à direita a camada estruturante de feltro.

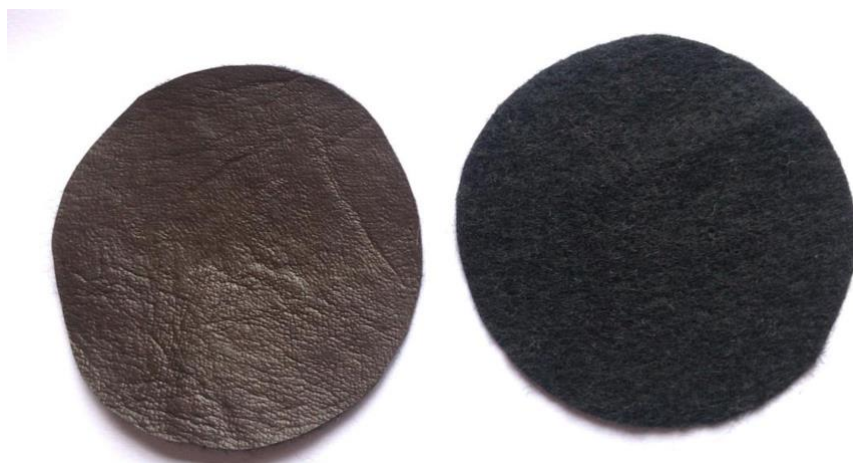
**Figura 20 –Material B – Courino Matelassê**



**Fonte: Autora (2021)**

Na Figura 21 está disposto o Courino Liso (material C), à esquerda o lado direito, também de PVC e à direita a camada estruturante de feltro.

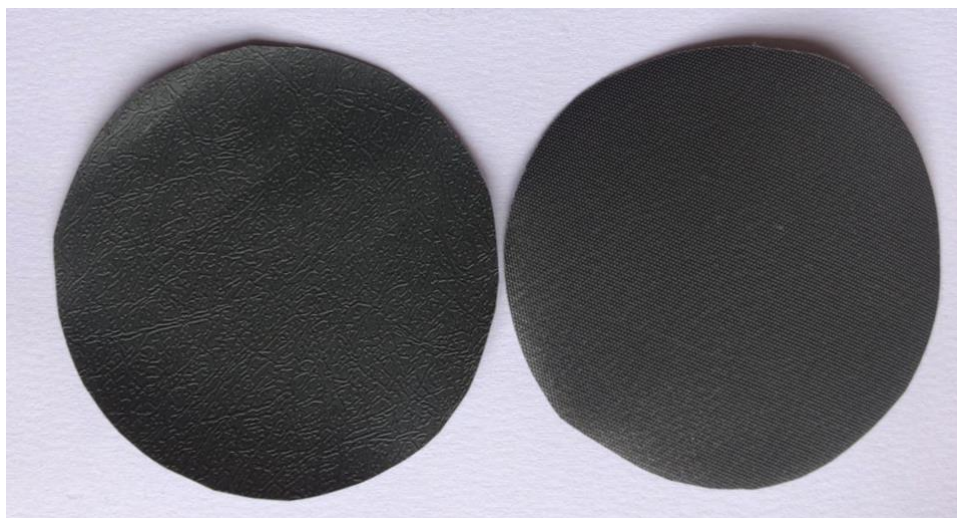
**Figura 21 –Material C – Courino Liso**



**Fonte: Autora (2021)**

Na Figura 22 está disposto o Nylon 70 (material D), à esquerda uma fina película de PVC, e à direita uma trama fina de náilon.

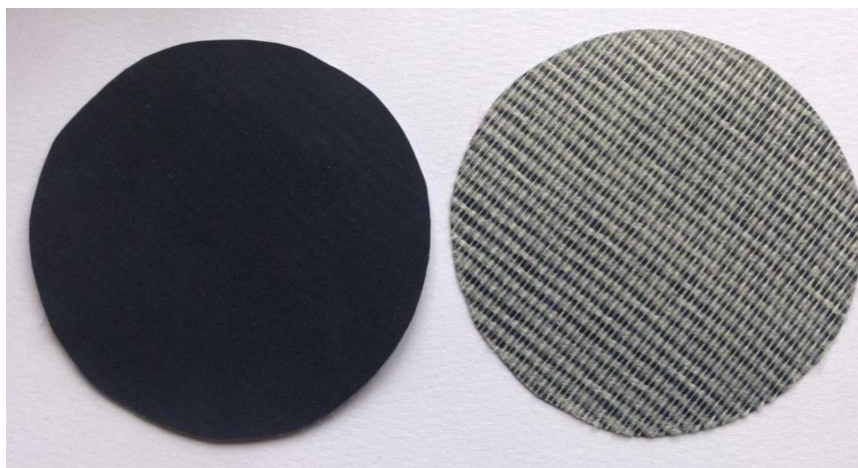
**Figura 22 –Material D – Náilon 70**



Fonte: Autora (2021)

Na Figura 23 está disposto o Bagum (material E), à esquerda uma película de PVC, e à direita uma trama aberta de poliéster.

**Figura 23 – Material E - Bagum**



Fonte: Autora (2021)

Na Figura 24 estão dispostos os tecidos que não possuem diferença visível a olho nu entre um lado e outro. São, respectivamente: 1. Manta Flanelada (Material K), 2. *Soft* (Material I), 3. Gabardine (Material G) e 4. *Microsoft* (Material J).

**Figura 24 – Fotografia Tecidos**

Fonte: Autora (2021)

O único tecido que possui diferença visível do direito e avesso é o *Jacquar Matelasse* (Material H), que está disposto na Figura 25. Lado direito, com o matelassê, à esquerda e lado avesso à direita.

**Figura 25 – Fotografia Tecido H**

Fonte: Autora (2021)



Os materiais que possuem diferenças entre os lados foram sempre ensaiados com o lado direito, lado que ficará exposto no ambiente como cortina ou *blackout* e que está à esquerda nas fotos.

### 3.3 MÉTODOS

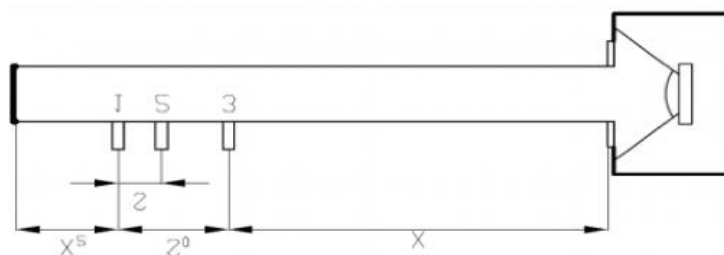
#### 3.3.1 Etapa 1 – Ensaio de Absorção Acústica

Para a realização da medição do coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ), foram seguidas as recomendações da norma ISO 10534-2 (*Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method*). Neste estudo, o coeficiente de absorção foi medido na faixa de frequência entre 200 Hz e 2700 Hz. Foi observado pelas curvas de absorção que essa é a faixa mais confiável para o tubo em questão.

Esse ensaio é realizado em um tubo de impedância, que é utilizado para obter o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) de uma amostra de material, que é colocada em uma das extremidades do tubo, oposta à do alto-falante. Esse processo foi realizado no Laboratório de Acústica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

A representação esquemática e as dimensões do tubo de impedância utilizado neste trabalho estão apresentadas na Figura 26 e no Quadro 7. O tubo de impedância utilizado neste trabalho foi desenvolvido e apresentado no estudo “Construção de um tubo de impedâncias e teste através do método de função de transferência” (BUSULO, 2017).

**Figura 26 - Representação Esquemática do Tubo de Impedância.**



**Fonte: Busulo (2017).**

**Quadro 7 - Dimensões tubo de impedância**

Dimensões do tubo de impedância e distância entre os microfones					
Distância a fonte sonora "x"	Distância microfones "S <sub>o</sub> "	Distância microfones "S"	Distância amostra "x <sub>2</sub> "	Comprimento total	Diâmetro do tubo
200 mm	90 mm	50 mm	250 mm	540 mm	50 mm

Fonte: Busulo (2017).

### 3.3.1.1 Equipamentos e programas computacionais para o ensaio

Para realizar a medição do coeficiente de absorção no tubo de impedância foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Microfone de 1/2" com pré-amplificador da marca 01dB;
- Conversor AD/DA (placa RME Multiface II);
- Amplificador de potência;
- ITA *toolbox* e Matlab.

A faixa de frequências analisadas pelo tubo utilizado é de 200 Hz a 2700 Hz. Inicialmente, a banda de oitava de 250 Hz, que apresenta limites de 177 Hz a 355 Hz, foi avaliada a partir de 200 Hz. A banda de oitava de 2000 Hz, que apresenta limites de 1420 Hz a 2840 Hz, foi avaliada até 2700 Hz. No Capítulo 4 está disposta a medição do tubo com e sem o porta-amostras, demonstrando a absorção do tubo utilizado.

Durante os ensaios, foram medidos os valores de temperatura e umidade do ar e realizados os testes para calibração do equipamento com e sem o porta-amostras.

Como as medições preliminares tiveram caráter comparativo do que absoluto, o efeito do porta-amostra não foi problemático. Notou-se que a presença dos tecidos auxiliou a não ressonância: os resultados com tecido nas baixas frequências mais próximos (e até mais baixos) do que comparados com o resultado do tubo vazio, sem porta amostra.

Para o ensaio final, foram realizados três ensaios por amostra, sendo as amostras testadas as seguintes:

- *Soft*, em camada simples (I);
- *Microsoft*, em camada simples (J);

- *Jacquar* Matelassê, em camada simples (H);
- Gabardine, em camada simples (G);
- Manta Flanelada, em camada simples (K);
- Courino Matelassê, em camada simples (B);
- Bagum, em camada simples (E);
- Náilon 70, em camada simples (D);
- Courino Liso, em camada simples (C);
- Náilon Dublado, em camada simples (A).

Posteriormente, foram testados os tecidos em camada dupla, e as combinações de blackouts. Os blackouts foram testados em combinações para otimização de seu custo. Foram testados:

- *Soft*, em duas camadas (II);
- *Microsoft*, em duas camadas (JJ);
- *Jacquar* Matelasse, em duas camadas (HH);
- Gabardine, em duas camadas (GG);
- Manta Flanelada, em duas camadas (KK);
- Náilon Dublado, em duas camadas (AA);
- Courino Matelassê, em duas camadas (BB);
- Courino Matelassê, em combinação com o Bagum (BE);
- Courino Liso, em combinação com o Bagum (CE);
- Courino Matelassê, em combinação com o Náilon 70 (BD);
- Courino Liso, em combinação com o Náilon 70 (CD);

Visto que combinações de três camadas de determinados materiais também levariam a um custo elevado quando utilizados na prática, a terceira camada foi substituída pelo Náilon Dublado (A), que ficou na parte interna e não afetaria a estética da cortina.

- *Soft*, em duas camadas e Náilon Dublado (IAI);
- *Microsoft*, em duas camadas e Náilon Dublado (JAJ);
- *Jacquar* Matelasse, em duas camadas e Náilon Dublado (HAH);
- Gabardine, em duas camadas e Náilon Dublado (GAG);
- Manta Flanelada em duas camadas e Náilon Dublado (KAK);
- Náilon Dublado, em três camadas (AAA);
- Courino Matelassê, em duas camadas e Náilon Dublado (BAB);

- Courino Matelassê, em combinação com o Bagum e Náilon Dublado (BAE);
- Courino Liso, em combinação com o Bagum e Nailon Dublado (CAE);
- Courino Matelassê, em combinação com o Náilon 70 e Náilon Dublado (BAD);
- Courino Liso, em combinação com o Náilon 70 e Náilon Dublado (CAD).

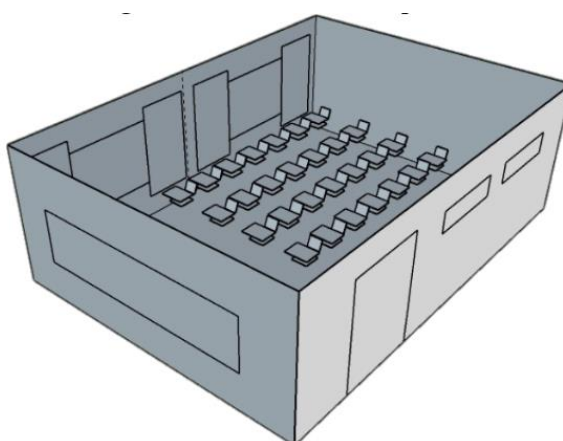
### 3.3.2 Etapa 2 - Técnica de Simulação com Software I-Simpa

Após a obtenção dos coeficientes de absorção sonora dos tecidos, *blackouts* e suas combinações no tubo de impedância, esse coeficiente de absorção normal foi transformado em coeficiente de absorção sonora difusa por meio da Equação 6 (MECHEL, 2008):

$$\alpha_{dif} = 8 \left( \frac{2}{1-\sqrt{1-\alpha_0}} - \frac{1-\sqrt{1-\alpha_0}}{2} + 2 \ln \frac{1-\sqrt{1-\alpha_0}}{2} \right) \cdot \left( \frac{1-\sqrt{1-\alpha_0}}{1+\sqrt{1-\alpha_0}} \right)^2 \quad (6)$$

Para a simulação computacional foi utilizado o modelo da sala de aula em três dimensões conforme trabalho de Ribeiro (2020). O modelo é feito com superfícies planas e foi realizado no *software Sketchup*, por meio de formas geométricas básicas. Na Figura 27 é possível observar o modelo utilizado.

**Figura 27 – Modelagem Sala de Aula**



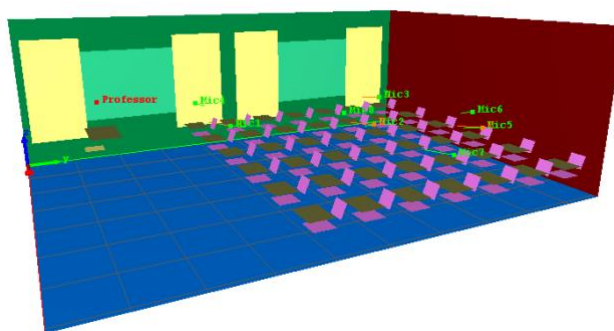
**Fonte: Ribeiro (2020).**

O objetivo da simulação no Software I-Simpa é facilitar a comparação dos diferentes materiais a serem utilizados, para facilitar a escolha do material a ser ensaiado na Etapa 4. Os valores adotados para as absorções e espalhamentos dos

materiais foram os mesmos adotados por Ribeiro (2020). Para os *blackouts* lisos, foi adotado um coeficiente de espalhamento de 0,5 e 0,6 para as frequências de 500HZ e 1000 Hz, respectivamente, e para as cortinas em tecido foi adotado, 0,8 e 0,9. Esses valores foram calculados pelas aproximações recomendadas no Manual do Usuário ODEON (ODEON, 2018).

O modelo foi inserido no I-Simpa e é possível observar a configuração da sala no software na Figura 28. Para cada modelo de cortina foi criado um novo material, no qual eram alterados os dados de absorção, espalhamento e densidade do material.

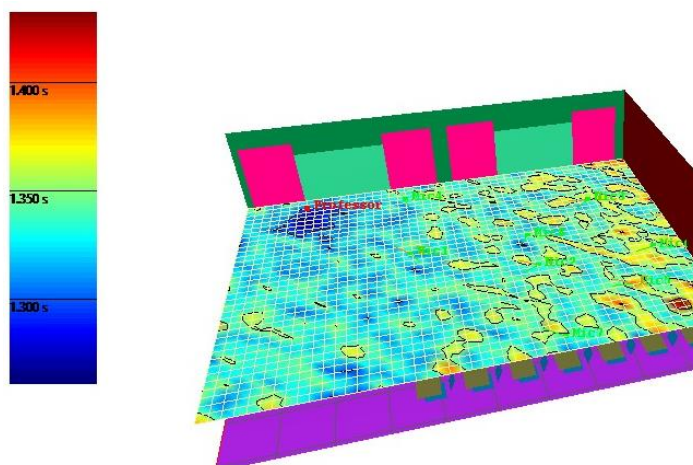
**Figura 28 – Modelagem Sala de Aula**



**Fonte: Autora (2021).**

Assim como no estudo de Ribeiro (2020), foram mantidos os receptores pontuais *Mic 1* a *Mic 8*. Para cálculo do parâmetro a ser analisado, foi criada uma superfície receptora na altura dos alunos (1,2m). Como a função dessa etapa foi de selecionar uma cortina, o parâmetro a ser analisado foi o Tempo de Reverberação ( $T_{20}$ ) médio. Foram realizadas simulações com as cortinas abertas, cuja área equivalente foi de 11 m<sup>2</sup> e também com as cortinas fechadas, cuja área foi de 15 m<sup>2</sup>. Foi realizada ainda uma simulação da sala de aula sem cortinas para comparação. Na Figura 29 é possível observar o comportamento do tempo de reverberação na superfície receptora com a cortina AAA aberta.

**Figura 29 – Superfície Receptora I-Simpa**



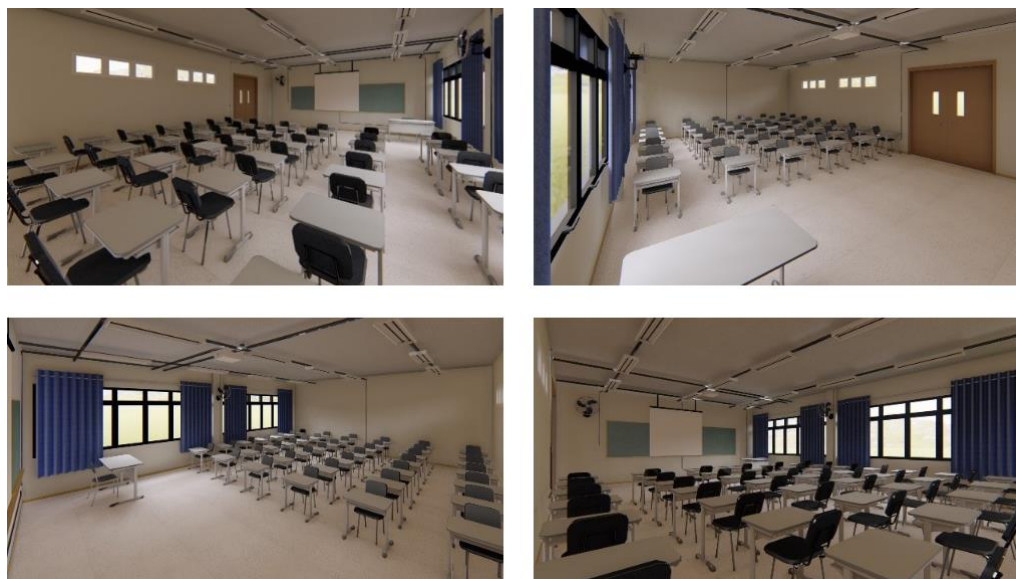
**Fonte: Autora (2021).**

No estudo de Labia *et al* (2020), é analisado o tratamento de duas salas de reuniões, de 520m<sup>3</sup> e 298m<sup>3</sup> no software ODEON. Para posterior comparações com medições *in loco*. O tratamento utilizado é por meio de painéis difusores e absorvedores, além da simulação da sala sem tratamento. Os resultados da simulação computacional e das medições na sala foram bastante semelhantes. Neste trabalho, apesar de ser utilizado outro *software*, espera-se também poder comparar ambas as medições.

Os resultados obtidos nesta etapa estão dispostos no Capítulo 4.3.

### 3.3.3 Etapa 3 - Preparo do Ambiente

A sala a ser ensaiada foi do campus Ecoville da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Curitiba. Essa sala foi estudada na pesquisa de Ribeiro (2020), o qual fez medições de resposta ao impulso na configuração padrão, com as cortinas que estão na sala. Na Figura 30 estão fotografias das perspectivas da sala de aula em questão. Essa possui as vedações verticais em alvenaria, laterais com esquadrias e painéis de gesso acartonado com preenchimento de lã de vidro (RIBEIRO, 2020).

**Figura 30 – Perspectivas da Sala de Aula**

Fonte: Cabral (2020).

Foram simuladas, na sala de aula, a cortina já presente, que é de Sarja (densidade semelhante ao *Jeans* do ensaio preliminar e o mais próximo do Gabardine nos demais ensaios), e cortina de *Soft* (I), com uma camada. Todo esse preparo foi feito substituindo as cortinas que estão instaladas na sala.

A cortina que está presente na sala possui cerca de 24m de comprimento total, sendo divididos em duas partes, ou seja, 12 metros de cortina para cada janela. Ela possui pregas de diferentes tipos, barras em todas as extremidades e altura de 1,80m.

Del Rey *et al* (2013) estudaram a absorção de cortinas com diferentes configurações dentro de uma câmara acústica, estudando as variações de franzimento das cortinas. Eles concluíram que a maior absorção ocorria com cerca de duas vezes e meia a área do vão, e a partir daí, não havia melhora significativa na absorção da cortina. Por isso, neste trabalho, foi escolhida uma quantidade de cortina próxima a duas vezes e meia o tamanho do vão em questão.

A cortina de *Soft* utilizada também possui cerca de 24m no total, pregas simples, altura de 1,65m, e não possui nenhuma barra. O ensaio foi realizado com as cortinas parcialmente abertas, com as cortinas fechadas e também foi realizado um ensaio da sala sem cortina. Para os ensaios com cortinas, foi utilizada sempre a mesma área equivalente para cada cortina.

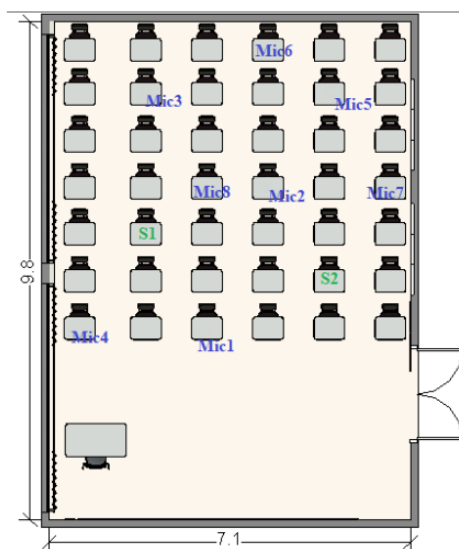
A planta da sala de aula com as posições das fontes (S1 e S2), as posições do microfone (Mic1, Mic2, Mic3, Mic4, Mic5, Mic6, Mic7 e Mic8) estão dispostos na Figura 31.

### 3.3.4 Etapa 4 – Ensaio de Resposta ao Impulso

O processo de medição das respostas ao impulso foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 3382-2:2018. Para as medições de resposta ao impulso na sala de aula foram adotadas cinco medições por ponto.

Foram adotados dois pontos para a fonte sonora, os pontos S1 e S2, como mostra a Figura 31. Com a fonte sonora na posição S1, foram feitas medições com o microfone na posição *Mic 1*, *Mic 2*, *Mic 3* e *Mic 4*. E com a fonte na posição S2 foram feitas medições com o microfone nas posições *Mic 5*, *Mic 6*, *Mic 7* e *Mic 8*, respeitando sempre as distâncias mínimas entre microfone e fonte estabelecidas em norma. Essa mesma metodologia e posições foi seguida no estudo de Ribeiro (2020).

**Figura 31 – Planta da Sala de Aula**



**Fonte: Adaptado de Ribeiro (2020).**

Observando a Figura 31, é possível notar que a parede onde estão as cortinas possui 9,8m, e a parede do quadro, 7,1m, totalizando 69,58m<sup>2</sup> de área. O pé direito

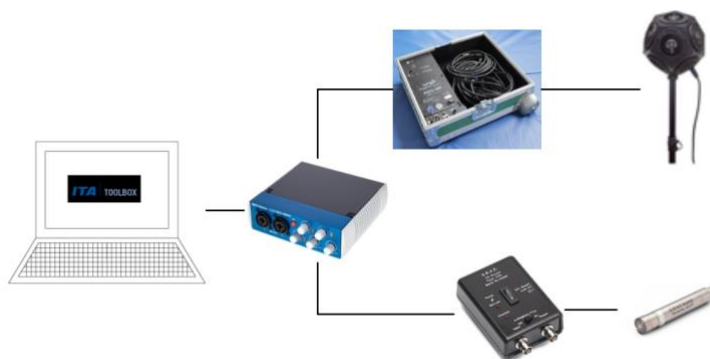


da sala em questão é de 3,25m, sendo o volume de 226,135m<sup>3</sup>. Para o ensaio na sala foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Interface de áudio Roland Quad Capture;
- Fonte sonora omnidirecional GROM DDC-100;
- Amplificador de referência Alesis RA-100;
- Microfone G.R.A.S. 46AQ de ½” com pre amplificador G.R.A.S. 26CA e fonte de energia G.R.A.S, 12AL;
- Computador com o *software Matlab* e com utilização da ferramenta *ITA Toolbox* (para aquisição, processamento e análise).

O esquema com os equipamentos utilizados está disposto na Figura 32. Foi usado o método sweep logarítmico com deconvolução circular para o cálculo do Tempo de Reverberação ( $T_{20}$ ). O  $T_{20}$  é definido como o tempo no qual a curva de decaimento alcança 5 dB e depois 25dB abaixo do instante inicial, sendo que multiplicado por três é equivalente ao Tempo de Reverberação  $T_{60}$ .

**Figura 32 – Esquema Equipamentos**



**Fonte: Ribeiro (2020).**

Para o cálculo da incerteza da medição foi utilizada a norma ISO 3741(2010) e a Equação 7.

$$\mu_T = \sqrt{\frac{2,42 \cdot T_{60}}{f} + \frac{S_T^2}{N_{decaimentos}}} \quad (7)$$

Sendo que:

$\mu_T$  é a incerteza da determinação do Tempo de Reverberação;

$T_{60}$  é o Tempo de Reverberação medido;

$S_T$  é o Desvio Padrão Amostral das medições realizadas;

$f$  é a Banda de Frequência de 1/3 de oitava referente à medição, Hz;

$N_{decaimentos}$  é o número de decaimentos em análise, que neste caso foram 10 decaimentos (dez medições)

Na Figura 33 está disposta a imagem do ensaio na sala com ambas as cortinas ensaiadas, à esquerda a cortina já presente na sala e à direita a cortina de soft. Os resultados obtidos e os respectivos gráficos e análises estão dispostos no Item 4.4.

**Figura 33 – Ensaio Resposta ao Impulso**



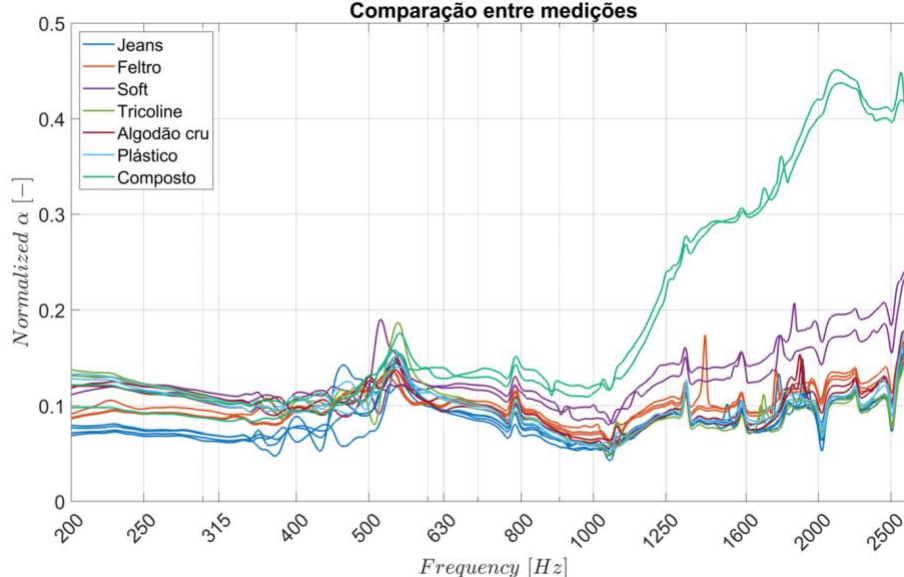
Fonte: Autora (2021).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ENSAIO PRELIMINAR

Com base na metodologia apresentada, foram realizados ensaios preliminares no tubo de impedância. Os resultados desses ensaios estão apresentados neste capítulo.

**Gráfico 1 - Medições de Absorção x Frequência em Tecidos e *Blackouts***  
Comparação entre medições



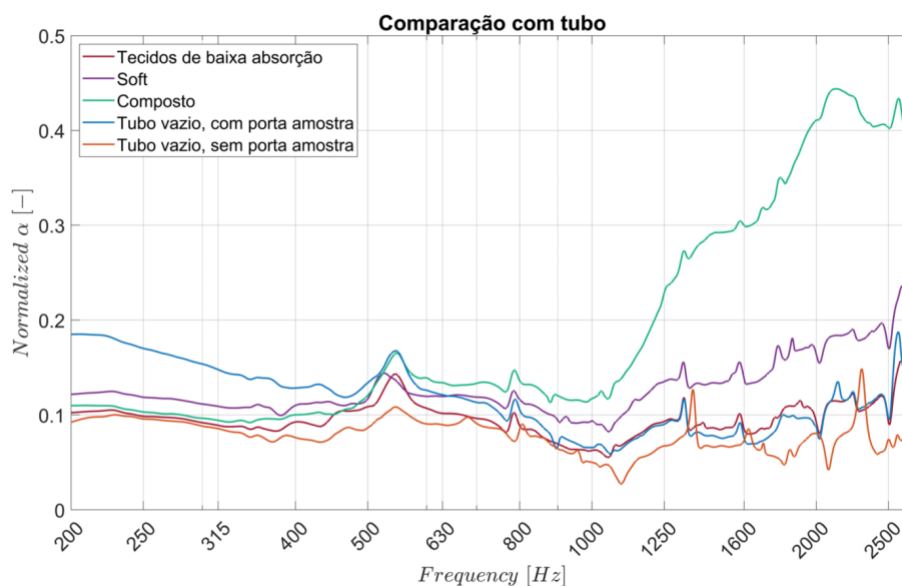
Fonte: Autora (2021).

No Gráfico 1 é possível observar que os tecidos com densidade na faixa de 120 g/m<sup>2</sup> até 150 g/m<sup>2</sup> estão na mesma faixa de absorção, principalmente para altas frequências. Os materiais com melhores resultados foram o *Soft* e o *Composto*, o qual é a união do Bagum com o Courino. Esse composto de dois materiais teve um resultado superior aos demais para altas frequências. As curvas dos demais tecidos estão semelhantes à curva do tubo vazio, presente no Gráfico 2.

Também foram medidos os valores de temperatura e umidade do ar durante as medições e foram realizados testes para calibração do equipamento com e sem o porta amostra. O porta amostra foi utilizado para melhor posicionar os tecidos dentro do tubo. Havia receio de que o artefato gerasse ressonâncias e causasse absorção elevada diferente do valor real. Portanto, foram analisadas as diferenças entre duas

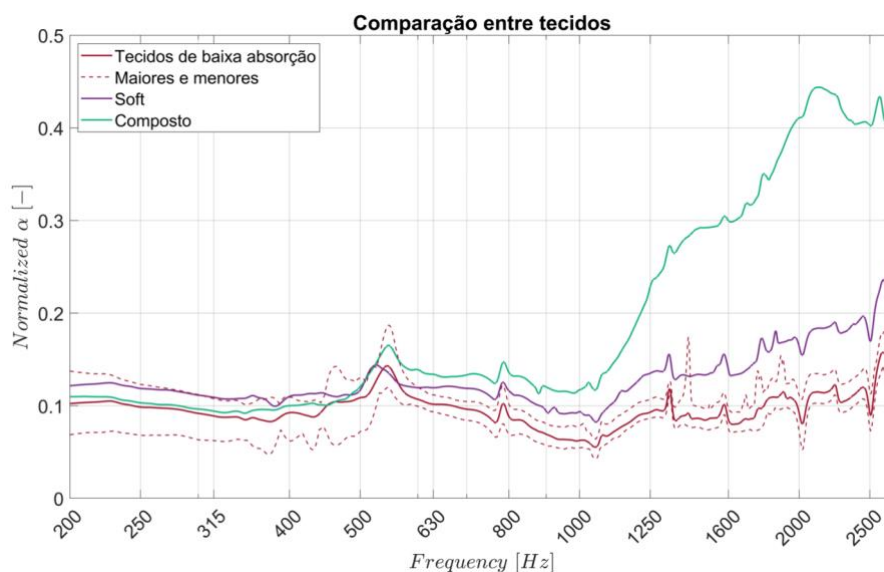
medições, uma sem e outra com o porta amostra, como é possível observar por meio do Gráfico 2 e do Gráfico 4. Como o intuito dessas medições foi gerar comparação, o porta amostra não exerceu influência nos resultados, gerando inclusive resultados coerentes com as os valores de Cox e D'Antonio (2017) e também de Tang *et al* (2019).

**Gráfico 2 – Medições de Absorção x Frequência com e sem Porta Amostra e Tubo Vazio**



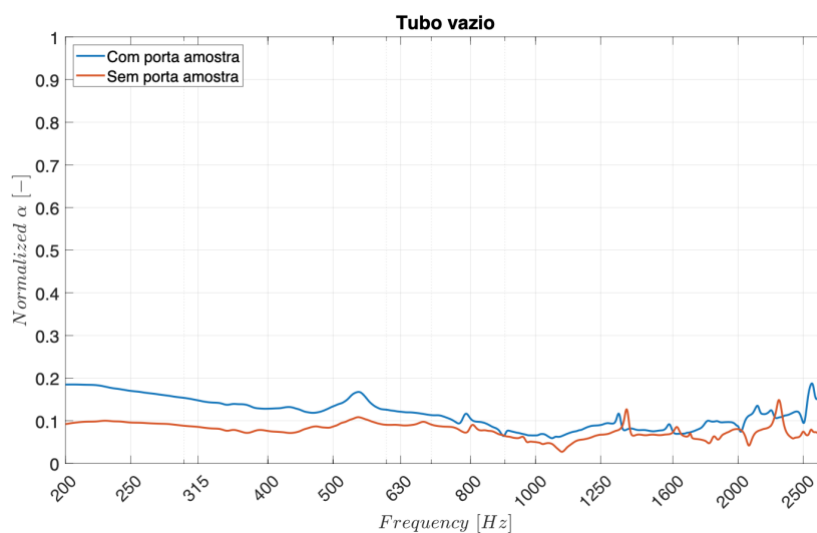
**Fonte: Autora (2021)**

No Gráfico 3 estão os materiais com melhores resultados e a faixa de absorção dos tecidos analisados, para facilitar a visualização. Neste gráfico nota-se que, apesar do melhor resultado de absorção para altas frequências do composto plástico, o tecido *Soft* foi o material que apresentou o melhor resultado para baixas frequências,.

**Gráfico 3 – Medições de Absorção x Frequência Resumo**

Fonte: Autora (2021)

No Gráfico 4 estão apenas os valores encontrados para a absorção do tubo vazio e do tubo com o porta amostras utilizado, para efeito de calibração e comparação.

**Gráfico 4 – Medições de Absorção x Frequência Tubo vazio e com porta amostra**

Fonte: Autora (2021)

No Quadro 8 estão resumidos de forma numérica os valores de absorção por banda de oitava e por material.

**Quadro 8 - Absorção por Banda de Oitava**

	f_250Hz	f_500Hz	f_1000Hz	f_2000Hz
1 Jeans	0.0704	0.0945	0.0751	0.1005
2 Feltro	0.0919	0.1050	0.0904	0.1213
3 Soft	0.1155	0.1187	0.1135	0.1741
4 Tricoline	0.1165	0.1137	0.0788	0.1012
5 Cotton	0.1117	0.1067	0.0808	0.1132
6 Plastic	0.1138	0.1100	0.0789	0.1082
7 Composto	0.1005	0.1240	0.1691	0.3806

Fonte: Autora (2021).

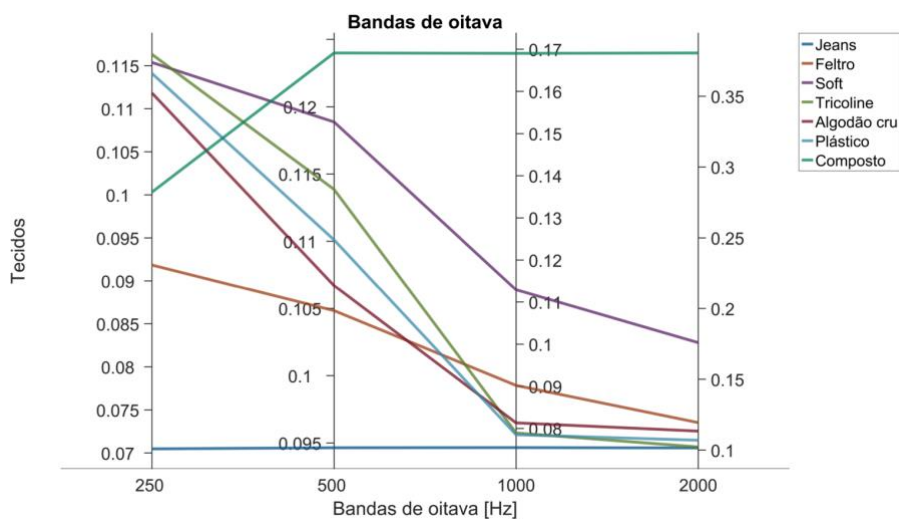
No Quadro 9 estão os desvios padrões calculados para os valores do Quadro 8. No Gráfico 5 estão os valores do Quadro 8 representados em gráfico, o coeficiente de absorção por banda de oitava para cada material ensaiado.

**Quadro 9 - Desvio Padrão por Banda de Oitava**

	f_250Hz	f_500Hz	f_1000Hz	f_2000Hz
1 Jeans	0.0032	0.0053	0.0020	0.0009
2 Feltro	0.0037	0.0010	0.0044	0.0024
3 Soft	0.0058	0.0069	0.0063	0.0145
4 Tricoline	0.0018	0.0025	0.0028	0.0043
5 Cotton	0.0043	0.0016	0.0028	0.0029
6 Plastic	0.0034	0.0048	0.0002	0.0013
7 Composto	0.0143	0.0034	0.0071	0.0063

Fonte: Autora (2021).

Gráfico 5 – Média de Absorção por Banda de Oitava



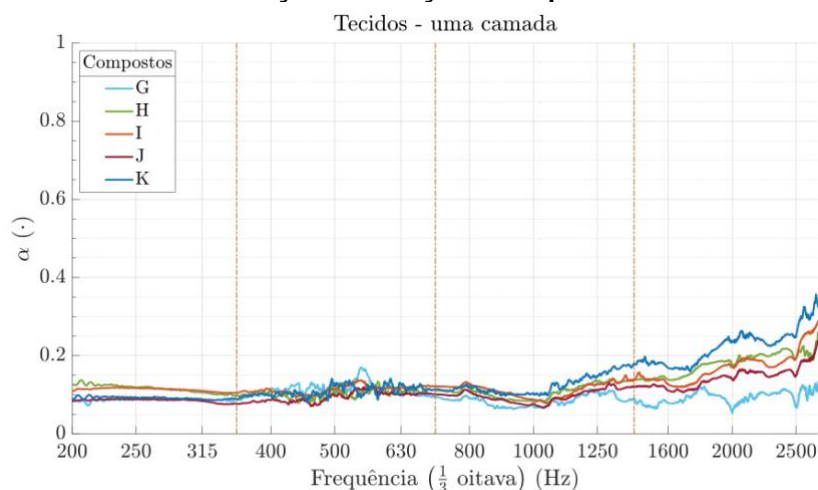
Fonte: Autora (2021).

Por meio desses ensaios preliminares, foi possível confirmar que quanto maior a densidade do tecido, maior é sua absorção. Devido a isso, o tecido Soft foi o que apresentou o melhor resultado de forma geral. Esse tecido também foi o material mais poroso entre os analisados, apesar dessa característica não ter sido mensurada, apenas observada.

Os valores obtidos para os têxteis analisados estão de acordo com os presentes na literatura, como os dados de absorção para veludos de Cox e D'Antonio (2017), sendo que pequenas variações ocorrem por conta da diferença de densidade dos materiais e o tecido não ser o mesmo analisado.

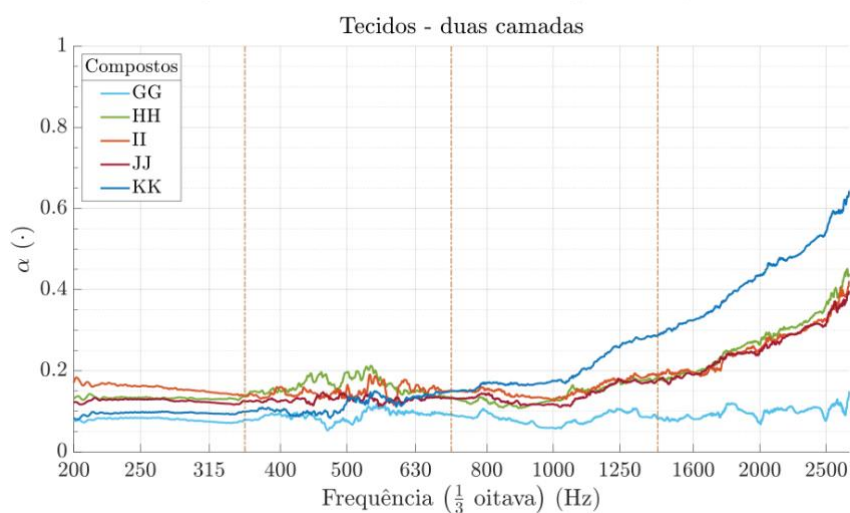
#### 4.2 ENSAIO ABSORÇÃO ACÚSTICA

Foi realizado um segundo ensaio no tubo de impedância com os materiais escolhidos. O resultado dos ensaios com os tecidos em uma camada simples está no Gráfico 6.

**Gráfico 6 - Medições Absorção x Frequência Tecidos**

**Fonte: Autora (2021).**

No Gráfico 6 é possível observar que o tecido mais denso (K) é o que tem a maior absorção para altas frequências. Esses valores estão de acordo com os valores para tecidos densos descritos em Cox e D'Antonio (2017). Já para frequências mais baixas os tecidos H e I que se destacaram. No caso do tecido I, provavelmente isso ocorreu por conta dos poros, que aumentam a absorção em baixas frequências, também de acordo com Cox e D'Antonio (2017). No Gráfico 7 estão dispostas as medições feitas com duas camadas de cada tecido.

**Gráfico 7 - Medições Tecidos duas camadas Absorção x Frequência**

**Fonte: Autora (2021).**

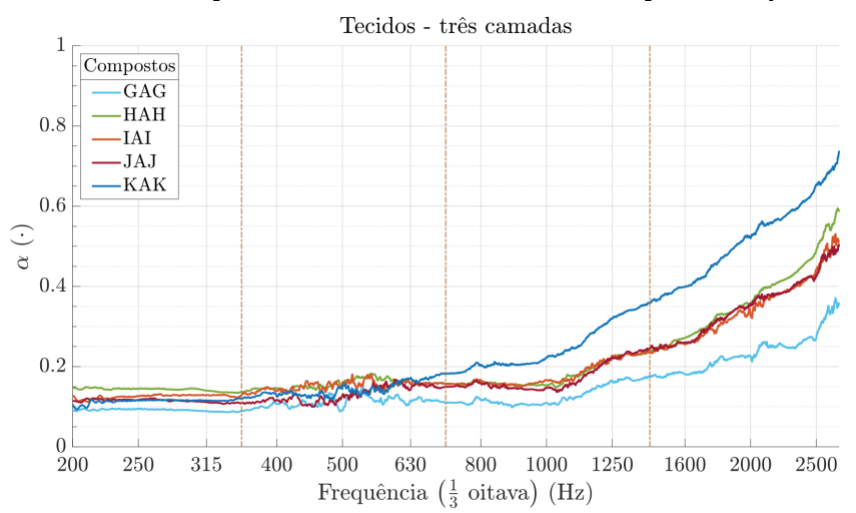


Observa-se no Gráfico 7 que existe diferença expressiva entre os tecidos com melhor desempenho para altas e para baixas frequências. Para baixas frequências continuam se destacando os tecidos I e H e para altas frequências o tecido K. O tecido I é o tecido *Soft*, que teve bons resultados no ensaio preliminar e o tecido H é o *Jacquar Matelassê*, mostrando que esse tipo de textura auxilia na absorção, como já era esperado. O efeito da segunda camada melhorou a absorção de todos os tecidos de forma geral, mesmo tendo sido testadas camadas do mesmo material.

As medições com três camadas de tecido, sendo uma delas de preenchimento, estão no Gráfico 8.

No caso das medições para três camadas, dispostas no Gráfico 8, a absorção não aumentou significativamente, logo essa opção foi descartada para o ensaio de resposta ao impulso. No estudo de Del Rey *et al* (2013), os valores de absorção para cortinas também possuem uma curva ascendente e chegam a determinados valores máximos com uma determinada espessura e franzimento, e a partir dali, não há mais melhora significativa com o aumento de camadas ou franzimento. Isso provavelmente ocorre por conta de a resistividade ao fluxo ter ultrapassado o valor de 100kPa/m<sup>2</sup> (DEL REY, 2013).

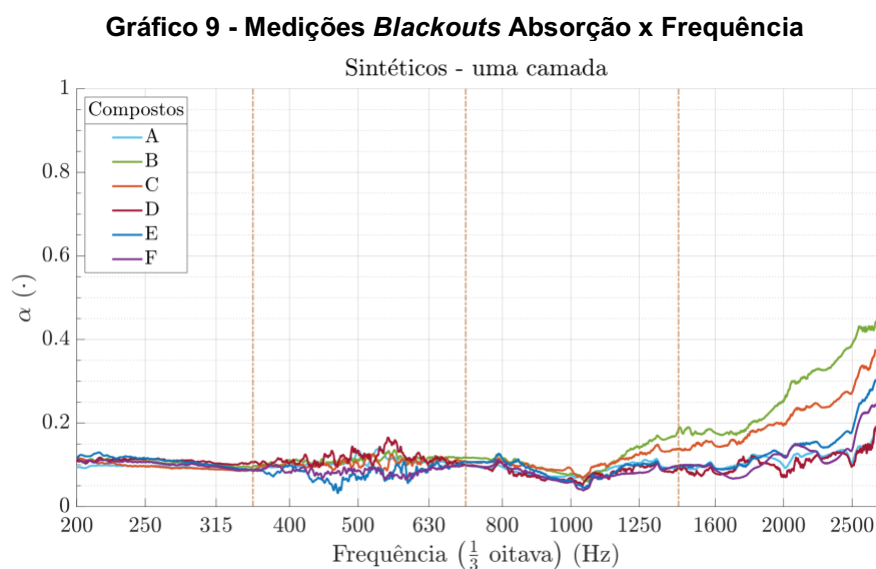
**Gráfico 8 - Medições Tecidos três camadas Absorção x Frequência**



**Fonte: Autora (2021).**

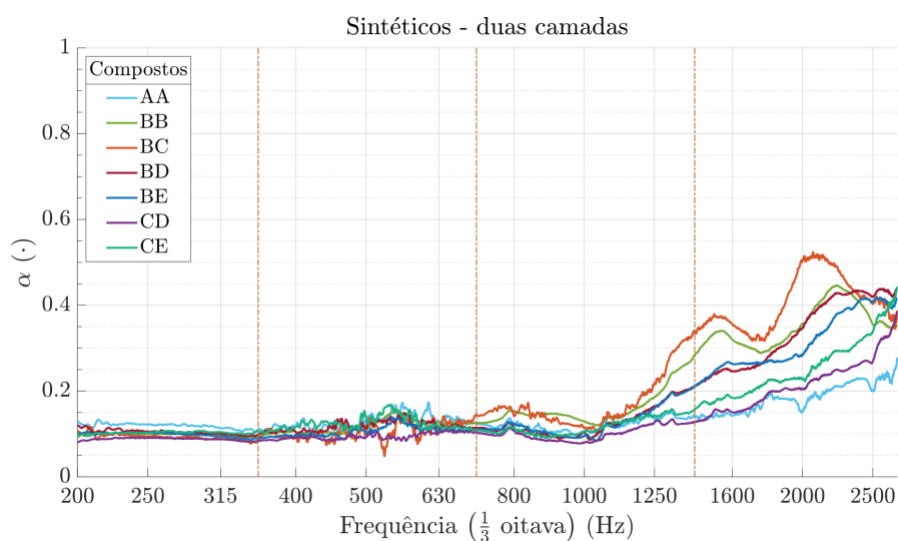
Também foram feitos ensaios de absorção acústica dos *blackouts*. Primeiramente, foi realizado o ensaio com apenas uma camada, apesar desses

materiais deverem ser utilizados em duas camadas por questões estéticas. O resultado dos ensaios com os *blackouts* em uma camada simples está no Gráfico 9.



No Gráfico 9 é possível observar que os *blackouts* ficaram na faixa de absorção de 0,05 até 0,15 para baixas frequências e os *blackouts* B e C tiveram absorções de até 0,4 e 0,38, respectivamente, para altas frequências. Esses dois materiais são os formados por uma camada de película de PVC e uma camada estruturante de feltro, mostrando o efeito das diferentes camadas, que também é observada no estudo de Segura-Alcaraz *et al* (2018).

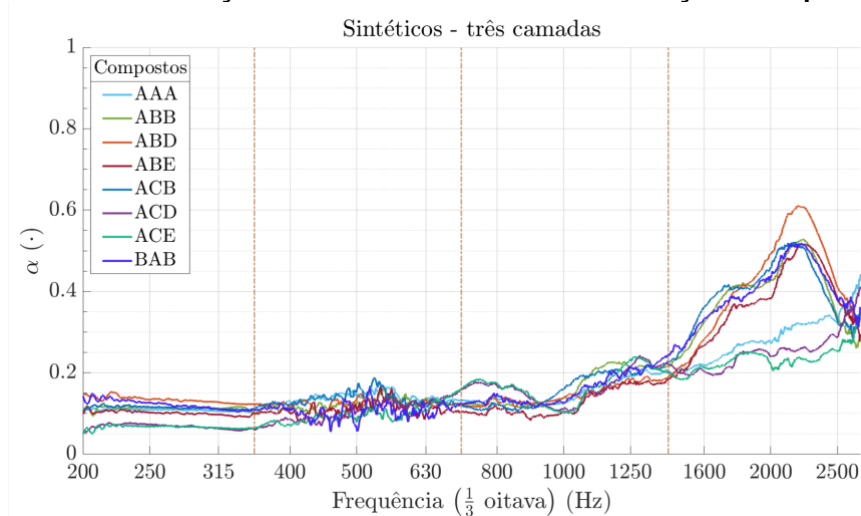
Posteriormente foram ensaiadas algumas combinações entre os *blackouts*. Essas combinações e os resultados estão disponíveis do Gráfico 10.

**Gráfico 10 - Medições *Blackouts* duas camadas Absorção x Frequência**

**Fonte: Autora (2021).**

Observando o Gráfico 10, nota-se um aumento no coeficiente de absorção dos materiais. O material A, o único poroso, com uma camada teve valor 0,07 e com duas camadas esse valor subiu para 1,2, para baixas frequências, sendo o material com o coeficiente mais alto para baixas frequências, como esperado pela literatura (COX E D'ANTONIO, 2017). E, dentre os demais, os que se destacam para altas frequências são os que possuem o material B (Courino matelassê) em sua composição, mostrando a influência da textura. Os materiais com combinações de camadas, que com apenas uma camada tinham chegado a um coeficiente máximo de 0,4 de absorção em altas frequência, com duas camadas chegaram a um coeficiente de 0,5, mostrando um aumento de 25%. O material com maiores absorções para altas frequências foi o BC, combinação de dois materiais com duas camadas distintas.

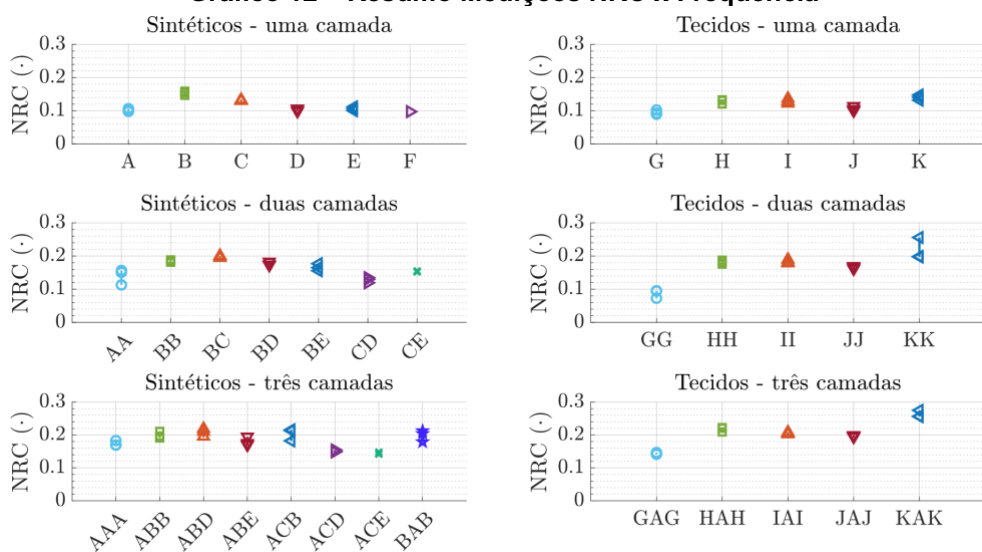
As combinações testadas no Gráfico 10 com mais uma camada de recheio do material A estão dispostas no Gráfico 11.

**Gráfico 11 - Medições *Blackouts* três camadas Absorção x Frequência**

Fonte: Autora (2021).

No Gráfico 11 há aumento da absorção de todos os materiais, mostrando que a combinação de diferentes materiais gera ganho de absorção, assim como no estudo de Segura-Alcaraz *et al* (2017) e também no estudo de Tang *et al* (2019). Também com 3 camadas, os materiais com maiores absorções para altas frequências possuem o material B na sua combinação, confirmando o efeito da textura. Para altas frequências, o coeficiente chegou a 0,6, mostrando um aumento de 20% com a terceira camada.

Já no Gráfico 12 estão dispostos os valores de NRC em gráfico para cada combinação de cortina para facilitar a comparação.

**Gráfico 12 – Resumo Medições NRC x Frequência**

Fonte: Autora (2021).

No Gráfico 12 é possível observar que o blackout B se destaca em camada única, e posteriormente também combinado com diversos outros materiais. Esse é o Courino Matelassê, mostrando que o efeito matelassê como textura foi importante e auxiliou nos resultados de absorção. Entre os tecidos, os materiais que se destacam são o H, o I e o K. Respectivamente, o Matelassê *Jacquar*, o *Soft* e a Manta Flanelada. Demonstrando o efeito do matelassê e do alto índice de vazios.

Os valores de NRC estão resumidos em tabela no Quadro 10.

**Quadro 10 – Valores obtidos de NRC**

TECIDOS						BLACKOUTS							
	G	H	I	J	K		A	B	C	D	E		
NRC	0,09	0,12	0,12	0,10	0,14	NRC	0,10	0,14	0,12	0,10	0,10		
	GG	HH	II	JJ	KK		AA	BB	BC	BD	BE	CD	CE
NRC	0,08	0,18	0,18	0,16	0,21	NRC	0,14	0,18	0,20	0,17	0,15	0,12	0,15
	GAG	HAH	IAI	JAJ	KAK		AAA	ABB	ACB	ABD	ABE	ACD	ACE
NRC	0,14	0,21	0,20	0,20	0,26	NRC	0,17	0,21	0,22	0,23	0,19	0,14	0,13

Fonte: Autora (2021)

No Quadro 10 é possível observar que em 96% das situações há aumento do NRC dos materiais quando são adicionadas mais camadas, mesmo que sejam do mesmo material. Isso provavelmente ocorre porque os tecidos possuem poros com diferentes tamanhos e formas, que influenciam a propagação do som de diferentes formas, o que altera a absorção do conjunto. Por isso, esse aumento variou conforme o material adicionado e melhorias mais significativas ocorreram com a adição de materiais diferentes.

#### 4.3 SIMULAÇÃO NO SOFTWARE I-SIMPA

De acordo com a ISO 3382-1, o valor único de  $T_{20}$  é a média dos valores de 500 e 1000Hz. O valor médio obtido, para cada combinação de cortina testada está disposto no Quadro 11. Também foi feita simulação da sala sem cortina, que chegou a um  $T_{20}$  médio de 1,49.

Quadro 11 – Valores obtidos de  $T_{20}$  no I-Simpa

Área: 11m2 2,76m2 X4				Área: 15m2 3,75m2 X4			
Cortinas Abertas				Cortinas Fechadas			
Tecidos		Blackouts		Tecidos		Blackouts	
	TR		TR		TR		TR
G	1,37	A	1,38	G	1,35	A	1,38
H	1,37	B	1,38	H	1,35	B	1,38
I	1,36	C	1,38	I	1,35	C	1,38
J	1,38	D	1,38	J	1,37	D	1,38
K	1,36	E	1,41	K	1,34	E	1,39
GG	1,39	AA	1,37	GG	1,39	AA	1,36
HH	1,32	BB	1,35	HH	1,29	BB	1,34
II	1,33	BC	1,37	II	1,29	BC	1,36
JJ	1,34	BD	1,37	JJ	1,32	BD	1,35
KK	1,33	BE	1,37	KK	1,31	BE	1,37
GAG	1,35	CD	1,39	GAG	1,34	CD	1,4
HAH	1,32	CE	1,35	HAH	1,29	CE	1,35
IAI	1,32	AAA	1,35	IAI	1,29	AAA	1,33
JAJ	1,33	ABB	1,35	JAJ	1,32	ABB	1,35
KAK	1,3	ABD	1,35	KAK	1,27	ABD	1,34
		ABE	1,37			ABE	1,36
		ACB	1,33			ACB	1,31
		ACD	1,36			ACD	1,36
		ACE	1,37			ACE	1,36

Fonte: Autora (2021)

Por meio dos valores obtidos no Software I-Simpa, foi possível observar que o tecido com melhor desempenho foi o K, seguido do H e do I. Por conta da facilidade de acesso ao material I e da diferença entre os  $T_{20}$  dos tecidos analisados ter sido menor do que a Diferença Mínima Perceptível (menos de 5%), ele foi o escolhido para ser ensaiado na sala de aula em questão. As simulações no *software* também mostraram que as diferenças entre a quantidade de camadas também variaram menos de 5%, o que justificou a escolha de apenas um tecido em camada simples para a simulação na sala.

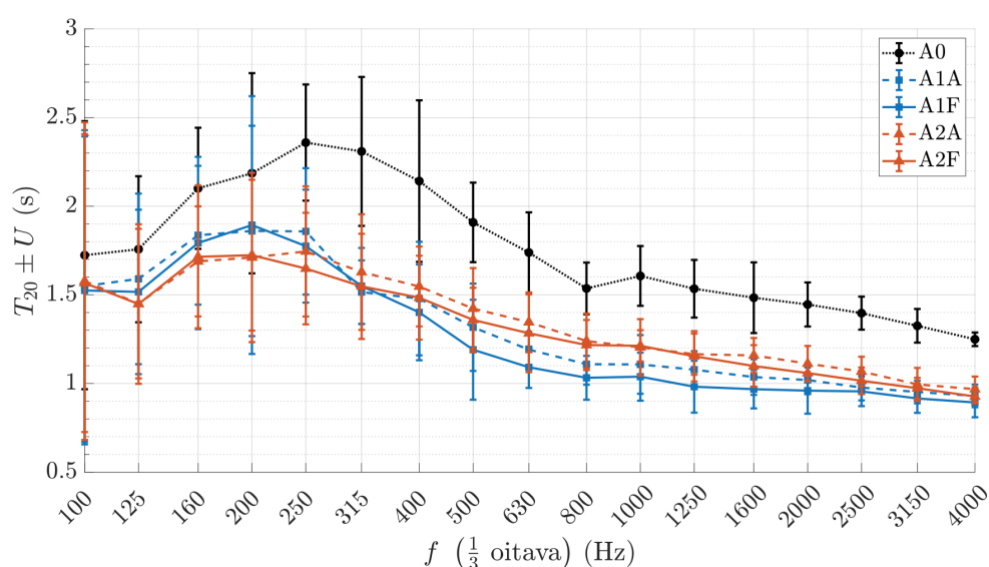
Com relação aos *blackouts*, a redução no tempo de reverberação foi menor porque estes são materiais planos, então seu espalhamento é menor do que o dos tecidos. Por isso, a diferença entre a adição de camadas e o tempo de reverberação médio variou menos de 2% até o máximo de 5% para 3 camadas. Mostrando que a adição de camadas desses materiais não gerou uma diferença perceptível.

#### 4.4 ENSAIO DE RESPOSTA AO IMPULSO

Estão dispostos no Gráfico 13 os resultados das medições realizadas no ensaio de resposta ao impulso e a incerteza dessas medições, sendo que:

- A0 - Medição da sala sem nenhuma cortina;
- A1A - Medição da sala com cortina já existente aberta;
- A1F - Medição da sala com cortina já existente fechada;
- A2A - Medição da sala com cortina em soft aberta;
- A2F - Medição da sala com cortina em soft fechada.

**Gráfico 13 – Medições Tempo de Reverberação**



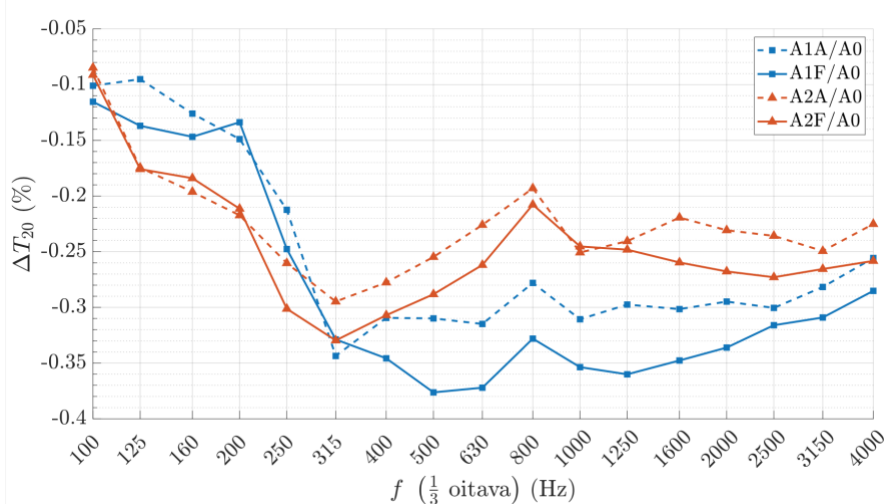
**Fonte: Autora (2021).**

Como é possível observar no Gráfico 13 e como esperado, ambas as cortinas reduziram o tempo de reverberação. Para as baixas frequências a cortina com menor tempo de reverberação foi a cortina em *Soft*, e para as frequências mais altas a cortina que teve um tempo de reverberação mais baixo foi a cortina que já estava presente na sala. Também é possível observar no Gráfico 13 que as incertezas das medições foram maiores nas baixas frequências do que nas altas frequências. Já a diferença entre as duas cortinas, foi menor, se comparado a sala sem cortinas, variou no máximo 18%, como é possível ver no Gráfico 15.

Os valores obtidos para o tempo de reverberação  $T_{20}$  estão próximos dos valores obtidos por Ribeiro *et al* (2021), que analisou a mesma sala em questão, porém com as cortinas abertas e tratamentos acústicos por meio de painéis.

No Gráfico 14, no eixo vertical estão as porcentagens relativas entre as cortinas e a sala sem cortina, e no eixo horizontal as frequências analisadas.

**Gráfico 14 – Comparação Percentual Sala com Cortinas e sem Cortinas**

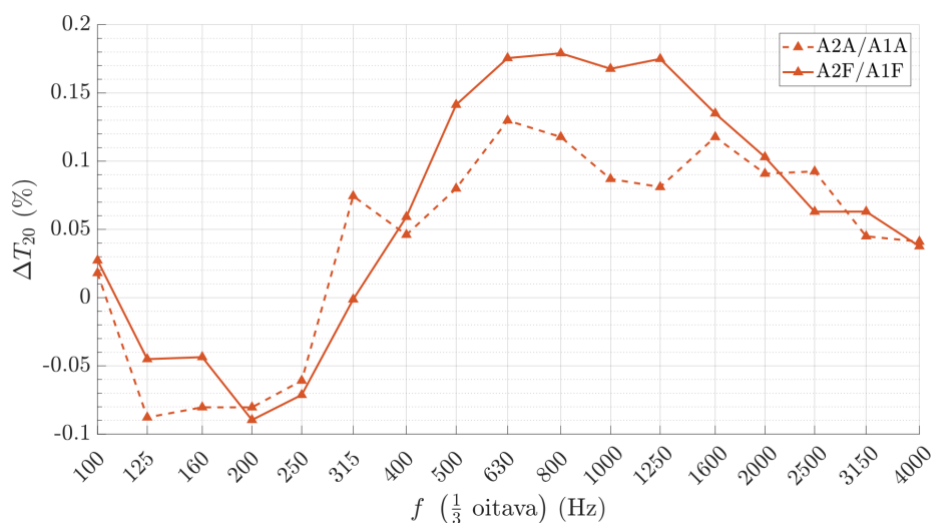


**Fonte: Autora (2021).**

É possível observar no Gráfico 14 que as porcentagens estão negativas pois houve redução do tempo de reverberação. Redução que chegou até 38% em 500 Hz, com a cortina já presente na sala fechada. E 33% em 315Hz com a cortina em *Soft* fechada. O Gráfico 14 mostra que a utilização de cortinas, de forma geral, reduziu o tempo de reverberação da sala em questão entre 8% até 38%. Apesar da redução do tempo de reverberação ter sido significativa, a sala em questão ainda não ficou com o tempo de reverberação ideal para a situação desocupada, que seria de 1,00s (RIBEIRO *et al*, 2021).

Já as porcentagens das relações entre a sala com as duas cortinas testadas estão expressas no Gráfico 15.



**Gráfico 15 – Comparação Percentual entre Cortinas**

Fonte: Autora (2021).

No eixo vertical do Gráfico 15 estão as porcentagens relativas entre a cortina em *Soft* e a cortina já existente na sala. É possível observar que em 200Hz a cortina em *Soft* reduziu o  $T_{20}$  em 10%. A partir de 250Hz existe uma inversão e a partir de 400Hz as porcentagens passam a ser positivas, mostrando que a cortina já existente na sala teve valores de  $T_{20}$  menores, chegando até a 18% menor em relação a cortina em *Soft* (I) a partir dessas frequências. Isso pode ter ocorrido por causa da diferença de altura e de acabamento entre as cortinas, pois a cortina em *Soft* (I) não cobriu completamente o trilho.

No Quadro 12 estão dispostos os valores médios do Tempo de Reverberação  $T_{20}$  obtidos na simulação no software I-Simpa e o valor obtido no ensaio de resposta ao impulso.

**Quadro 12 – Comparação  $T_{20}$  Simulado e Medido**

Tempo de Reverberação Médio ( $T_{20}$ ) (s)			
	Simulado	Medido	Diferença
A0	1,49	1,75	17%
A2A	1,36	1,3	4%
A2F	1,36	1,27	7%

Fonte: Autora (2021)

Também estão no Quadro 12 as diferenças entre os valores encontrados no *software* e na medição. A maior diferença foi entre a sala sem cortina, que foi uma diferença de 17%. Já com a cortina em *Soft*, essa diferença foi de 4% para as cortinas abertas e 7% para as cortinas fechadas. A diferença mínima perceptível é de 5%, ou seja, com as cortinas abertas não houve diferença perceptível. Essas diferenças também foram inferiores e próximas ao estudo de Ribeiro *et al* (2021). A cortina já presente na sala teve o  $T_{20}$  médio menor. Foi 1,2s para cortina aberta e 1,025s para cortina fechada. Chegou muito próximo do tempo ideal para a sala desocupada (1,00 s). Ou seja, o impacto real da utilização de cortinas no  $T_{20}$  médio variou de 25,7% até 41,4%.

No estudo de Labia *et al* (2020), a maior diferença encontrada entre a medição em *software* e a medição *in loco* também foi no ambiente sem tratamento acústico, porém no caso daquele trabalho o coeficiente simulado no *software* foi maior que o medido, ao contrário deste trabalho. Já para as simulações com o tratamento com cortinas, ocorreu o oposto, os valores de  $T_{20}$  simulado foram maiores do que os medidos na sala.

## 5 CONCLUSÃO

Por meio da caracterização foi possível qualificar e quantificar propriedades dos têxteis que influem na sua absorção, como a quantidade e tamanho de poros, a densidade e a textura. Além de propriedades estéticas como a capacidade de permitir ou não a passagem de luz.

Ao avaliar os ensaios no tubo de impedância conclui-se que tanto tecidos quanto *blackouts* possuem uma curva característica e que a combinação entre materiais pode ser vantajosa para encontrar materiais com maiores coeficientes de absorção. Também foi possível confirmar que materiais mais porosos possuem uma absorção maior para baixas frequências e que a densidade foi um fator importante para a absorção em altas frequências. O aumento de camadas levou a uma melhora na absorção, que não foi linear, e não compensou ser usada na prática. Além disso, foi possível comprovar que a textura dos materiais exerce influência na absorção, tanto em tecidos quanto em *blackouts*.

Por meio da simulação com os diferentes materiais no *software* I-Simpa, conclui-se que a quantidade de cortina utilizada no ambiente influencia no seu espalhamento e que isso tem um impacto maior na absorção do que o material utilizado ou o número de camadas. No caso dos *blackouts*, a sobreposição de camadas também não gerou melhora significativa no tempo de reverberação na simulação no *software*.

Com o ensaio de resposta ao impulso, foi possível obter o parâmetro tempo de reverberação médio ( $T_{20}$ ), que teve uma redução de 41,7% da sala sem cortina para a melhor situação. A melhor situação, cortina original da sala fechada, está de acordo com a norma brasileira NBR 12179:1992, que pede um TR entre 1,1 e 0,7 para uma sala com esse volume na banda de 500Hz. Já levando em conta a norma americana ANSI ASA S12.60/2, que pede valores de 0,6 para a sala em questão, a sala não está acusticamente ideal em nenhuma das situações. Seria recomendado a utilização de mais cortinas ou a adição de outro material absorvedor no ambiente.

Através dos ensaios realizados, conclui-se que o desempenho acústico das cortinas na sala de aula em questão foi significativo. Mesmo em ambientes grandes, como o que foi ensaiado, a cortina com área de apenas 16% da área de piso do ambiente teve impacto superior a 30% no tempo de reverberação em determinadas frequências. E redução que variou de 21,7% até 41,4% no tempo de reverberação

médio  $T_{20}$  e chegou muito próximo ao valor recomendado, que é de 1,0s para a sala em questão.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aumentar a área de cortinas na sala para chegar no Tempo de Reverberação ideal;
- Investigar as absorções de cortinas com diferentes afastamentos da parede;
- Analisar diferentes proporções de tecidos para as cortinas e seus efeitos na absorção e no tempo de reverberação;
- Avaliar outros tecidos e *blackouts* na sala de aula;
- Avaliar outros tecidos e *blackouts* na câmara acústica;
- Avaliar a influência de outros fatores como a iluminância com a absorção ideal e cortinas fechadas.

## REFERÊNCIAS

ABIT. Associação Brasileira da Indústria Têxtil. **Perfil do setor**. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>> Acesso em: Out/2020a.

ABIT. Associação Brasileira da Indústria Têxtil. **Fibras Naturais**. Disponível em: <[www.abit.org.br](http://www.abit.org.br)>. Acesso em: 20 set. 2020b.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 10591 – **Materiais têxteis- Determinação da gramatura de superfícies têxteis**. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 12179 – **Tratamento Acústico em Recintos Fechados - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1992

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 139:2018. **Têxteis - Atmosferas Padrão para Condicionamento e Ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 15575 – **Norma de Desempenho de Edificações Habitacionais**. Rio de Janeiro, 2013

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 16313:2014. **Acústica - Terminologia**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3382:2017. **Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 1: Salas de espetáculos**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3382:2018. **Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AMARILHO-SILVEIRA, F.; BRONDANI, W. C.; LEMES, J. S. Lã: Características e fatores de produção. **Archivos de Zootecnia**, v. 64, n. 247, p. 13-24, 2015.

ABRAFAS. Associação Brasileira de Produtores de Fibras Naturais e Sintéticas. **Fibra Sintética**. Disponível em: <<http://www.abrafas.org.br/fibras/manufaturadas.html>>. Acesso em: Set/2020.

ANSI (*American National Standard*). ANSI S12.60 – **Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools**. Melville, 2002

ASTM C423-17 **Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method**. ASTM International. 2017.

ASTM D3776/D3776M. **Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric**. ASTM International. 2009.

ARAÚJO, M.; MELO E CASTRO, E.M. **Manual de Engenharia Têxtil**. v. 1 e v. 2. 1648 p. Fundação Calouste Gulbekian, Lisboa (Portugal), 1984.

ARAÚJO, S. A. Perda Auditiva induzida pelo ruído em trabalhadores de metalúrgica. **Revista Brasileira de Otorrinolaringologia**, Curitiba (PR), v. 68, n. 1, p. 47-, 2002.

BARRON, F. Randall, **Industrial Noise Control and Acoustics**, CRC Press, 2002.

BASSUET, Alban; RIFE, Dave; DELLATORRE, Luca. Computational and optimization design in geometric acoustics. **Building Acoustics**, v. 21, n. 1, p. 75-85, 2014.

BHAN, Lam; WOON-SENG, Gan. Active acoustic windows: Towards a quieter home. **IEEE potentials**, v. 35, n. 1, p. 11-18, 2016.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. São Paulo: Blucher, 2016.

BRITO, G. F.; AGRAWAL, E. M.; ARAÚJO, T. A. J. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande. REMAP - **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.6.2, 2011

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. Editora Blucher, 2018.

BUSULO, W. F. **Construção de um tubo de impedâncias e teste através do método de função de transferência**. 2017. Trabalho de conclusão de curso. (Engenharia Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CABRAL, Marina C. **Modelagem paramétrica de uma sala de aula**. 2019. 10 desenhos técnicos, color.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**. Artiliber editora, São Paulo, p. 110-115, 2002.

CDC. *Centers for Disease Control and Prevention. Noise and Hearing Loss Prevention*. 19 abr. 2018. Disponível em:  
<<https://www.cdc.gov/niosh/topics/noise/reducenoiseexposure/noisecontrols.html>>, Acesso em jun/2020.

CHRISTENSEN, Claus Lynge. Investigating room acoustics by simulations and measurements. **Noise & Vibration Worldwide**, v. 44, n. 8, p. 21-27, 2013.

COIMBRA, Danielle Batista; OLIVEIRA, Francisco Correa de. Motivação e condicionantes para a gestão ambiental nas maiores indústrias exportadoras do estado do Ceará. **Cadernos EBAPE. BR**, v. 3, n. 3, p. 01-16, 2005.

COX, Trevor J.; D'ANTONIO, Peter. **Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application**. 3 ed. Boca Raton (EUA): CRC Press, 2017.

CUTIVA, L. C. C.; BURDORF, A. Effects of Noise and Accoustic in Schools on Vocal Health in Teachers. **Noise & Health**, v. 17, n. 74, p. 17, 2015.

DA ROCHA, Silvana Patricia Fernandes. Influência do tempo de reverberação no isolamento sonoro entre espaços. Dissertação. 2014.

DE MEDEIROS A. M., BARRETO S. M., ASSUNÇÃO, A. A. Voice disorders (dysphonia) in public school female teachers working in Belo Horizonte: Prevalence and associated factors. **J Voice**. v. 22 p.676–687, 2008.

DEL REY, R. et al. The acoustic absorption of textile curtains on the function of the fullness. **Materiales de Construcción**, v. 63, n. 312, p. 569-580, 2013.

DEMIRYÜREK, Oğuz; AYDEMİR, Hüsnü. Sound absorbing properties of roller blind curtain fabrics. **Journal of Industrial Textiles**, v. 47, n. 1, p. 3-19, 2017.

EPA, **United States Environmental Protection Agency**, Office of Air and Radiation, Washington, D.C. Novembro, 2009 Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/ochnp\\_noise\\_fs\\_rev1.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/ochnp_noise_fs_rev1.pdf)>. Acesso em: 18 ago. 2020.

ETENE, Escritório técnico de estudos econômicos do nordeste. Informe técnico. **Análise Retrospectiva e Prospectiva do Setor Têxtil no Brasil e no Nordeste**. Fortaleza, 2014.

FAROL. Testes audiométricos realizados pela prefeitura. **Reportagem**. 12 mai. 2018. Disponível em: <<https://farolnews.com.br/testes-audiometricos-gratuitos-sao-realizados-pela-prefeitura-ate-este-sabado-12/>> Acesso em 20 out. 2020.

FABIANO, S.; BRASOLOTTO, A. **Efeitos acústicos do uso profissional da voz pelo professor**. Laringologia e voz hoje. In: Temas do IV Congresso Brasileiro de Laringologia e Voz. [S,l.]: Revinter, p. 399, 1998

FERREIRA, Marcelo Silva; SOUTO, Jeniffer Santos; SPÍNOLA, Kelly Alcântara. ANÁLISE ACÚSTICA DAS SALAS DE AULAS DO EDIFÍCIO MÓDULO II DA FACULDADE INDEPENDENTE DO NORDESTE-FAINOR. **Ciência & Desenvolvimento-Revista Eletrônica da FAINOR**, v. 12, n. 2, 2019.

FAO. 2011. June, kenaf, Sisal, Abaca, Coir and Allied Fibres - Statistics. s.l. : Food and Agriculture Organization of the United Nations, CCP: JU/HF/ ST / 2011/1, 60 p.

FCEM, *Febratex Group*, **Diferenças entre Tecidos e Fibras**. Disponível em: <<https://fcem.com.br/noticias/diferencas-entre-os-tipos-de-tecidos-e-fibras/>> Acesso em 15 Set. 2020.

FERREIRA, José Augusto Coelho; ZANNIN, Paulo Henrique Trombetta. Determinação de coeficientes de isolamento acústico: medições in situ e simulação computacional. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 2, p. 15-29, 2007.

FIANCHINI, M. Noise in schools. A systemic approach to improve acoustic comfort. **Sustainable Mediterranean Construction**. 2018.

FLORES, Carlos E. Polímeros VS. plásticos. **Revista Electronica Nro 14**, v. 14, p. 51, 2009.

FUNDACENTRO, **Curso de Engenharia de Segurança do Trabalho**, ed. Revista Ampliada, São Paulo, 1981.

GERGES, Samir NY. **Ruído: fundamentos e controle**. 2 ed, NR Editora, Florianópolis, 2000.

GASPARINI, S. M.; BARRETO, S. M.; ASSUNÇÃO, A. Prevalência de transtornos mentais comuns em professores da rede municipal de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 22, n. 12, p. 2679-2691, 2006

GAUDEOSO, C.; BARBO, Marselle; BRANDÃO, Eric. Tutorial para o Uso do Software Gratuito de Simulação em Acústica Geométrica: I-Simpa - **XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica**, Porto Alegre, 2018.

GOINES, L.; HAGLES, L. Noise Pollution: A Modern Plague. **Southern Medical Journal** v. 100, n. 3, p. 287-294, 2007

GONÇALVES, V. S. B.; SILVA, L. B.; COUTINHO, A. S. **Ruído como agente comprometedor da inteligibilidade de fala dos professores**. Produção, v. 19, n. 3, p. 466-476, Associação Brasileira de Engenharia de Produção. São Paulo, Brasil 2009.

GONÇALVES, Adriano dos Santos. **Caracterização acústica de espumas de poliuretano: absorção sonora**. Dissertação (Mestrado) Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

GUIMARÃES, Bárbara Maria Gama. **Estudo das características físico-químicas de fibras têxteis vegetais de espécies de Malvaceae**. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo, 2014.



GULHANE, Sujit Shrikrushnarao. Review on acoustic properties of textiles. **Applied Acoustics**, v. 48, p. 101-120, 1996.

HAO, Ayou; ZHAO, Haifeng; CHEN, Jonathan Y. Kenaf/polypropylene nonwoven composites: The influence of manufacturing conditions on mechanical, thermal, and acoustical performance. **Composites Part B: Engineering**, v. 54, p. 44-51, 2013

HOPKINS, Carl. **Sound insulation**. Oxford, Reino Unido: Elsevier, 2007.

HONGU, T. PHILLIPS, O. G. New Fibers. Second edition, p. (1 -5 / 209 -234). ISBN 1 85573 334 X. **Woodhead Publishing Limited**. Cambridge, England, 1997.

IEMI - INSTITUTO DE ESTUDOS E MARKETING INDUSTRIAL. Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira: Brasil têxtil 2011. São Paulo: IEMI, 2011.

INGARD, K. U.; DEAR, T. A. **Measurement of acoustic flow resistance**. JSV, v. 103, n. 4, p. 567-572, 1985.

ISO, E. N. 3382-2, 2008, **Acoustics—Measurement of Room Acoustic Parameters—Part 2: Reverberation Time in Ordinary Rooms**. International Organization for Standardization, Brussels, Belgium, 2008.

ISO I. S. 9053-1. 2018. **Acoustics – Determination of airflow resistance**. International Standard. London, W4 4AL, UK, 2018.

ISO, I. S. 10534-1. 1996. **Acoustics—Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 1: Method using standing wave ratio**. International Standard. London, W4 4AL, UK, 1996.

ISO, E. N. 10534-2, **Determination of sound absorption coefficient and acoustic impedance with the interferometer**. 1998

ISO, E. N. B. S. 12127: 1998, **Textiles Fabrics Determination of mass per unit area using small samples**, 1998.

KLEIN, Cátia Dulcinéia Francisco. **Síntese e caracterização de poliésteres termoplásticos**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

KRISTIANSEN, Jesper. Determinants of noise annoyance in teachers from schools with different classroom reverberation times. **Journal of Environmental Psychology**, v. 31, n. 4, p. 383-392, 2011.

KUASNE, A. **Fibras têxteis**. In: **Curso têxtil em malharia e confecção - 2o módulo**. Ministério Da Educação, Secretaria De Educação Média E Tecnológica Centro

Federal De Educação Tecnológica De Santa Catarina, Unidade De Araranguá. Araranguá, 2008.

LABIA, Laura; SHTREPI, Louena; ASTOLFI, Arianna. Improved room acoustics quality in meeting rooms: investigation on the optimal configurations of sound-absorptive and sound-diffusive panels. In: **Acoustics. Multidisciplinary Digital Publishing Institute**, p. 451-473, 2020.

LAVER, J. TUCKER, A. DE LA HAYE, A. **Costume and fashion. A concise history.** p. 8 – 13. 4 Ed. ISBN: 0500203482 W Norton & Co Inc. London, 2002.

LEVANDOSKI, Gustavo; ZANNIN, Paulo Henrique Trombetta. Quality of Life and Acoustic Comfort in Educational Environments of Curitiba, Brazil. **Journal of Voice**, 2020.

LIMA-SILVA, Maria Fabiana Bonfim de et al. Distúrbio de voz em professores: autorreferência, avaliação perceptiva da voz e das pregas vocais. **Revista da Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia**, v. 17, n. 4, p. 391-397, 2012.

LONG, M. **Architectural acoustics**. Elsevier, USA, 2014.

MARTINS, Gilson S. et al. Caracterização mecânica e térmica de compósitos de poli (cloreto de vinila) reforçados com fibras de sisal. **Polímeros**, v. 14, n. 5, p. 326-333, 2004.

MECHEL, F. P. **Formulas of Acoustics**. 2. ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2008.

NEPOMUCENO, L. A. **Elementos de acústica física e psicoacústica**. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1994.

NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health, **Noise and Hearing Loss Prevention**, 2018. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/niosh/topics/noise/reducenoiseexposure/noisecontrols.html>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor**. Editora Blucher, 2018.

OCHOA, Juliana Herlemann; ARAÚJO, Daniel Lima; SATTLER, Miguel Aloysio. Análise do conforto ambiental em salas de aula: comparação entre dados técnicos e a percepção do usuário. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 91-114, 2012

ODEON. Odeon - **Manual do Usuário**. 15a versão. 2020. Disponível em: <<https://odeon.dk/download/Version15/OdeonManual.pdf>>. Acesso em: 16. mai 2021.

PALMA, Alexandre et al. Nível de ruído no ambiente de trabalho do professor de educação física em aulas de ciclismo indoor. **Revista de Saúde Pública**, v. 43, p. 345-351, 2009.

PEREIRA, Ricardo N. (2010), **Caracterização Acústica de Salas**. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.

PEREIRA, T. C. B. ; BONATES, M. F.; SILVA A. C.; SILVA L.B.; COUTINHO A. S. Avaliação das condições termofísicas e perceptivas em ambientes climatizados de unidades universitárias. XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2003. **Anais**. Ouro Preto; p. 101-109, 2003.

PEZZOLO, Dinah Bueno. **Tecidos: história, tramas, tipos e usos**. Editora Senac São Paulo, 2019.

PIEREN, Reto et al. Sound absorption of textile curtains—theoretical models and validations by experiments and simulations. **Textile Research Journal**, v. 88, n. 1, p. 36-48, 2018.

PIERI, Roberta; FOIATO, Maiara; CARELLI, Jhulis Marina. Estudo do conforto acústico das instalações da Unoesc Campus de Capinzal, SC. **Conhecimento Em Construção**, v. 7, p. 83-100, 2020.

PISANI, Angela Paulina Grandaux. **Estudo de cortinas black-out como componentes no isolamento sonoro de fachadas**. Dissertação. (Mestre em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2008.

PIZOLATO, Raquel Aparecida et al. Evaluation of risk factors for voice disorders in teachers and vocal acoustic analysis as an instrument of epidemiological assessment. **Revista CEFAC**, v. 15, n. 4, p. 957-966, 2013.

PROACUSTICA, **Cortinas Acústicas**. Disponível em:  
<<https://www.proacustica.com.br/cortina-completa/>> Acesso em: 30 Set. 2020

PROTESSOM, **Preço de Isolamento Acústico por m<sup>2</sup>**. Disponível em: <  
<http://www.proteessomacustica.com.br/isolamento-acustico-preco-m2.php>> Acesso em: 10 nov. 2020.

RIBEIRO, Rodrigo Scoczynski. **Caracterização do condicionamento acústico de uma sala de aula com o uso de painéis de madeira**. Tese. (Doutor em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

RIBEIRO, Rodrigo Scoczynski et al. Acoustical treatment characterization of a classroom with wood-based composites. **Applied Acoustics**, v. 178, p. 107967, 2021.

ROMERO, Luiz Lauro et al. **Fibras artificiais e sintéticas**. BNDES, 1995.

SEGURA-ALCARAZ, Pilar et al. The use of fabrics to improve the acoustic absorption: influence of the woven fabric thread density over a nonwoven. **Autex Research Journal**, v. 18, n. 3, p. 269-280, 2018.

SILENCE. **Esquadrias Acústicas**. Disponível em: <<http://silenceacustica.com.br/esquadria-aluminio-acustica.php>> Acesso em: 29 out. 2020.

SILVA, Carlos Miguel Ferreira et al. O tempo de reverberação e a inteligibilidade da palavra: caso de estudo: salas de aula da FEUP. Dissertação. (Mestre em Engenharia Civil) Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

SILVA, João Paulo Melo da. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas em compósitos da fibra modal e poliéster**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

TANG, Xiaoning et al. Sound absorption properties of nonwoven fabric based multi-layer composites. **Polymer Composites**, v. 40, n. 5, p. 2012-2018, 2019.

WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y. T.; **Handbook of Environmental Engineering: Advanced Air and Noise Pollution Control**. Volume 2. Humana Press Inc. Totowa, New Jersey, 2005.

WEN, Xiaoying et al. Impacts of traffic noise on roadside secondary schools in a prototype large Chinese city. **Applied Acoustics**, v. 151, p. 153-163, 2019.

WHO, World Health Organization, **Urban Health**, 2020a. Disponível em: <<https://www.who.int/health-topics/urban-health>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

WHO, World Health Organization, **Noise**, 2020b. Disponível em: <<https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/noise>>. Acesso em: 19 ago. 2020.

WHO, World Health Organization, **Guidelines for Community Noise** 2020c Disponível em: <https://www.who.int/docstore/peh/noise/ComnoiseExec.htm>< Acesso em: 20 ago. 2020.

YANG, Shu; YU, Weidong; PAN, Ning. Investigation of the sound-absorbing behavior of fiber assemblies. **Textile Research Journal**, v. 81, n. 7, p. 673-682, 2011.

ZANNIN, Paulo Henrique Trombetta; FERREIRA, Andressa Maria Coelho. *Field measurements of acoustic quality in university classrooms*. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 68, p. 1053-1057, 2009.

## APÊNDICE A - Estrutura Química dos Polímeros

- Divisão dos Polímeros quanto à Estrutura Química

Para essa classificação, analisa-se o polímero através da estrutura química do seu mero. De acordo com Canevarolo Junior (2013), duas subdivisões são possíveis: polímeros de cadeia carbônica e polímeros de cadeia heterogênea. Nesta divisão será abordado apenas os polímeros mais utilizados como estruturas para blackouts.

- **Polímeros de cadeia carbônica**

Entre os polímeros mais utilizados na divisão de cadeia carbônica estão:

- Polímeros de dienos

São polímeros derivados de monômeros com dienos, isto é, duas duplas ligações carbono-carbono reativas. Estes polímeros são borrachas que podem ser vulcanizadas com enxofre. Como exemplos temos o policloropreno (CR), conhecido popularmente como neoprene, a borracha nitrílica (NBR) e a borracha natural (NR) (CANEVAROLO JUNIOR, 2013).

- Polímeros clorados

Nessa categoria estão os monômeros clorados, como o policloreto de vinila (PVC). O PVC é o segundo termoplástico mais consumido do mundo, com o consumo mundial de resina superior a 27 milhões de toneladas. O Brasil é responsável por cerca de 2,5% da demanda mundial desse polímero. As forças intermoleculares geradas pela polaridade do átomo de cloro geram características adequadas para diversas aplicações. O átomo ainda atua como um marcador nos produtos de PVC, permitindo uma separação automatizada e otimizando o processo de reciclagem desse material (MARTINS *et al.*, 2004).

- Polivinil ésteres

Poliacetato de vinila (PVA) pertence a classe de polivinil ésteres, e é muito utilizado na forma de emulsões aquosas para a confecção de tintas. A partir da

desacetilação do PVA, obtém-se o poliálcool vinílico (PVAI), que é um dos poucos polímeros solúveis em água. Uma vantagem deste copolímero é a possibilidade de controle da sua velocidade de dissolução em água (via grau de desacetilação ou conteúdo de PVAI), sendo mais comumente utilizado para a confecção de cápsulas de medicamentos (CANEVAROLO JUNIOR, 2013).

- **Polímeros de cadeia heterogênea**

Ainda de acordo com Canevarolo Junior (2013), na classe de polímeros de cadeia heterogênea, a cadeia principal possui, além do carbono, outro átomo, conhecido por heteroátomo, cujos exemplos são o oxigênio, nitrogênio, enxofre, silício, etc.

- **Poliésteres**

Nos poliésteres, a ligação característica é a ligação éster  $-CO-O-$  podendo gerar cadeias saturadas (formando termoplásticos de engenharia) ou insaturadas (gerando termofixos), dependendo do tipo de material inicial empregado (saturado ou não) (CANEVAROLO JUNIOR, 2013). Os poliésteres são a classe mais versátil de polímeros termoplásticos e vêm mostrando um crescimento significativo nas mais diversas aplicações, como automotiva, plásticos de engenharia, eletrônicos e adesivos. Esse crescimento ocorre por conta de suas propriedades de resistência térmica, química, rigidez, processabilidade e moldabilidade. Sendo somente o PET (polietileno tereftalato) responsável por 70% do volume de poliésteres termoplásticos do mundo. O grande crescimento na utilização de PET em garrafas descartáveis, e a poluição que isto tem gerado ao meio ambiente, torna-o atualmente um dos polímeros mais reciclados (KLEIN, 2009).

- **Poliâmidas**

A ligação amida  $-NH-CO-$  define esta classe, subdividindo-se em produtos naturais (proteínas, seda, lã) e os sintéticos. O nome popular mais comum das poliâmidas é náilon. Esses materiais são termoplásticos de engenharia por conta da sua alta resistência mecânica e estabilidade dimensional. A alta resistência mecânica que estes materiais possuem se deve às ligações do tipo pontes de hidrogênio,

formadas entre as carbonilas de uma cadeia e o hidrogênio da ligação amida da outra cadeia. Por outro lado, a presença desta ligação facilita a permeação de água, o que torna as poliamidas higroscópicas (CANEVAROLO JUNIOR, 2013).