



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS BLUMENAU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA TÊXTIL

Eduardo Volkart da Rosa

**Estudo da influência das camadas de não tecido formada pelo dobrador de véus  
horizontal na absorção acústica**

Blumenau

2021

Eduardo Volkart da Rosa

**Estudo da influência das camadas do não tecido formada pelo dobrador de véus  
horizontal na absorção acústica**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Têxtil.  
Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fernanda Steffens.

Blumenau  
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Volkart da Rosa, Eduardo

Estudo da influência das camadas de não-tecido formada  
pelo dobrador de véus horizontal na absorção acústica /  
Eduardo Volkart da Rosa ; orientadora, Fernanda  
Steffens, 2021.

82 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Têxtil, Blumenau, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Não-tecido. 3. Poliéster. 4.  
Têxtil técnico. I. Steffens, Fernanda . II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Têxtil. III. Título.

Eduardo Volkart da Rosa

**Estudo da influência das camadas do nãotecido formada pelo dobrador de véus horizontal na absorção acústica**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. José Ivan de Medeiros

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Arcanjo Lenzi

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Têxtil.

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rita de Cássia Siqueira Curto Valle

Coordenadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Têxtil

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Fernanda Steffens

Orientadora

Blumenau, 2021.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e saúde!

À minha esposa Tatiane Bruscato e meu filho Arthur da Rosa, que por muitas vezes negligenciei com minha ausência, e os mesmos compreenderam. Através de seu amor e carinho me mantiveram perseverante nesta jornada.

Aos meus pais, pelo amor e educação e ensinamentos da vida, os quais me possibilitaram uma boa educação. Meu pai com seus ensinamentos sobre a vida e seu jeito gauchesco, e minha mãe, um exemplo de doação e dedicação.

À minha orientadora e amiga Dr<sup>a</sup>. Fernanda Steffens, da UFSC, Campus Blumenau, que sempre me motivou e buscou de forma insistente o ótimo e nunca o bom.

Uma homenagem póstuma ao professor Dr. Fernando Ribeiro Oliveira, que deixou um exemplo de profissionalismo e assertividade.

Ao Sr. Tiago Altenburg, diretor da empresa em que atuo, que desde o primeiro momento que comentei sobre a intenção de realizar o mestrado, me apoiou e motivou.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê. ” (SCHOPENHAUER, 1860)

## RESUMO

A absorção acústica consiste basicamente na transformação da energia mecânica em energia térmica, realizada através da interação das fibras com a onda de som, por meio da quebra destas ondas, e de seu encontro com a superfície das fibras. Dentre os diversos materiais que podem ser usados para esta finalidade, vem se destacando a utilização de não tecidos. A produção do não tecido é afetada por diversos fatores, entre eles pela quantidade de camadas dispostas no dobrador de véus. Nesse sentido, quanto maior for a quantidade de camadas, menor será a velocidade de linha de produção. Diante disso, o objetivo desse estudo foi avaliar a influência na absorção acústica causada pela variação da quantidade das camadas de véus de não tecido de poliéster durante sua formação. Para isso, foram produzidos três grupos de não tecido com diferentes camadas de véus (24, 40 e 58 camadas) de igual espessura e densidade, compostos por uma mistura de fibras de poliéster. O não tecido foi produzido pelo processo de cardagem à seco, seguindo a um dobrador de véus horizontal e consolidado termicamente. Parâmetros estruturais das fibras utilizadas como matéria-prima (morfologia e densidade linear), bem como características das diferentes amostras produzidas de não tecido (resistência a tração, permeabilidade ao ar e capacidade de absorção acústica) foram avaliados durante o estudo. Além disso, afim de identificar um ponto de equilíbrio entre a absorção acústica e produtividade do equipamento, foi avaliada a relação entre o desempenho acústico do não tecido que foi produzido e sua velocidade de produção. Os resultados mostraram que a variação do número de camadas do não tecido apresentaram uma pequena variação no coeficiente de absorção acústica. Quanto maior a quantidade de camadas maior foi o coeficiente de absorção. No entanto, esta variação não foi significativa quando observado as várias frequências sonoras de absorção. Nesse sentido, desenvolver um não tecido com um menor número de camadas foi mais produtivo. Além disso, a velocidade de produção decresceu à medida que o número de camadas aumentou. Assim, a produção de um não tecido com menor número de camadas é economicamente mais rentável sem perder seu desempenho técnico, neste caso de absorção acústica.

**Palavras-chave:** Não tecido. Poliéster. Têxtil técnico.

## ABSTRACT

The acoustic absorption consists basically in the mechanical energy transformation into thermal energy, through the fiber's interaction with sound waves, which happens by the break of the waves due to the join with the fiber's surface. Among several materials that can be used for this purpose, nonwoven fabrics are being highlighted. Its production is also affected by a number of parameters, such as number of layers laid out on the web folder, in other words, the higher number of the layers leads to a slower production line's speed. In this way, the aim of this study was to evaluate the influence on the acoustic absorption caused by the variation in the number of layers of polyester nonwoven during their formation. For this, three groups of nonwovens were produced with different layers of veils (24, 40 and 58 layers) of equal thickness and density, composed of a mixture of polyester fibers. The nonwoven was produced by the dry carding process, followed by a horizontal and thermally consolidated web folder. Structural parameters of the fibers used as raw material (morphology and linear density), as well as characteristics of the different samples produced from nonwovens (tensile strength, air permeability and acoustic absorption capacity) were evaluated during the study. In addition, in order to identify a balance point between the acoustic absorption and productivity of the equipment, the relationship between the acoustic performance of the nonwoven being produced and its production velocity was evaluated. The results showed that the variation in the number of nonwoven layers presented a small variation in the acoustic absorption coefficient. The greater the number of layers, the higher was the absorption coefficient. However, this variation was not significant when observing the various absorption sound frequencies. In this way, developing a nonwoven with fewer layers was more productive. Furthermore, the production velocity decreased as the number of layers increased. Thus, the production of a nonwoven with a smaller number of layers was economically more profitable without losing its acoustic absorption capacity.

**Keywords:** Nonwoven. Polyester. Technical textile.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção de crescimento de não tecidos por área de aplicação (2018-2023).....	15
Figura 2 – Fluxo internacional de não tecidos 2018 (1000 toneladas).....	16
Figura 3 – Importação e exportação brasileira de não tecido (2016-2019).....	17
Figura 4 – Importação brasileira de fibras sintéticas (2016-2019).....	18
Figura 5 – Importação brasileira de fibras sintéticas por país de origem (2019). ....	18
Figura 6 – Importação brasileira de fibra poliéster (2016-2019).....	19
Figura 7 – Evolução da produção de energia primária no Brasil (1998, 2008 e 2018).....	22
Figura 8 – Comparativo entre paredes <i>drywall</i> sem e com material isolante.....	22
Figura 9 – Classificação das fibras têxteis. ....	23
Figura 10 – Fórmula química do PET. ....	24
Figura 11 – Fibras naturais e recicladas utilizadas na produção de materiais para isolamento acústico.....	24
Figura 12 – Utilização final RPET. ....	25
Figura 13 – Técnicas de formação, consolidação e acabamento de não tecidos.....	26
Figura 14 – Projeção de crescimento de não tecidos de acordo com a tecnologia de formação (2018-2023). ....	27
Figura 15 – Aplicação de não tecidos na Europa (2018).....	27
Figura 16 – Formação de não tecido via seca aerodinâmico.....	28
Figura 17 – Formação de não tecido via seca cardado.....	28
Figura 18 – Dobrador de véus horizontal. ....	30
Figura 19 – Camadas de véus de não tecido sobrepostas.....	30
Figura 20 – Morfologia da fibra bicomponente. a) Lado a lado. b) Núcleo-cora. ....	32
Figura 21 – Seção transversal de uma fibra bicomponente núcleo-coroa ampliada 1000 vezes. ....	33
Figura 22 – Representação de uma onda de som.....	34
Figura 23 – Camadas do não tecido.....	37
Figura 24 – Sistema de medição acústica por tudo de impedância. ....	43
Figura 25 – Representação esquemática das atividades experimentais.....	46
Figura 26 – Aparelho medição densidade linear. ....	47
Figura 27 – Fardos de fibras nos carregadores.....	49

Figura 28 – Carda para produção das amostras.....	49
Figura 29 – Carda, dobrador de véus e forno para consolidação. ....	50
Figura 30 – Ensaio de tração. a) Preparação das amostras. b) Realização do ensaio.....	52
Figura 31 – Equipamento para teste de permeabilidade ao ar.....	52
Figura 32 – Tubo de impedância com diâmetro 107 mm. a) Vista frontal do equipamento. b) Configuração do tubo. ....	53
Figura 33 – Tubo de impedância diâmetro 26 mm. a) Vista frontal do equipamento. b) Configuração do tubo. ....	54
Figura 34 – Corpos de provas de uma amostra de não tecido. ....	54
Figura 35 – Dispositivo de fixação dos corpos de provas. a) Sem amostras de não tecido. b) Com amostras de não tecido.....	55
Figura 36 – Saída da carda de dois véus formando uma camada. ....	58
Figura 37 – Comparação entre a gramatura das camadas de véus teórica e prática.....	59
Figura 38 – MEV das fibras utilizadas para a produção do não tecido. ....	60
Figura 39 – Véus sobrepostos em camadas na saída do dobrador horizontal. ....	61
Figura 40 – Painéis de amostras de não tecido.....	61
Figura 41 – Resistência à tração das diferentes amostras de não tecido. ....	62
Figura 42 – Resistência à tração para cada grupo de não tecido (MD e CD). a) 24 camadas. b) 40 camadas. c) 58 camadas.....	63
Figura 43 – Exemplo simplificado da estrutura de um não tecido com multicamadas. ....	64
Figura 44 – Ligação das camadas de véus comprometida no ensaio de tração.....	65
Figura 45 – Formação do ângulo “ $\alpha$ ” no dobrador de véus.....	66
Figura 46 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar para as diferentes amostras de não tecidos. ....	67
Figura 47 – Absorção acústica para as diferentes amostras de não tecido. a) Grupo A com 24 camadas. b) Grupo B com 40 camadas. c) Grupo C com 58 camadas.....	68
Figura 48 – Comparação da absorção acústicas entre as diferentes amostras A, B, e C.....	69
Figura 49 – Comparativo do NRC dos grupos de amostras. ....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Título médio das fibras em <i>denier</i> . .....	56
Tabela 2 – Quantidade de véus por camada de amostra. ....	58
Tabela 3 – Desenho experimental das amostras produzidas. ....	61
Tabela 4 – Valores de NRC de diferentes materiais e revestimentos de superfície. ....	71
Tabela 5 – Desempenho de produtividade das diferentes amostras de nãotecidos. ....	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Segmentos e aplicações dos têxteis técnicos. ....	14
Quadro 2 – Percepção humana ao nível de som. ....	35
Quadro 3 – Fibras utilizadas. ....	45
Quadro 4 – Orientação das amostras para o ensaio de tração. ....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABINT – Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos
- ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CD – Direção Transversal à máquina (*Cross Machine Direction*)
- EDANA – Associação Europeia de Descartáveis e Não tecidos (*European Disposables and Nonwovens*)
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
- INDA – Associação da Indústria de Não tecidos (*Association of the Nonwoven Fabrics Industry*)
- MD – Direção da Máquina (*Machine Direction*)
- NAC – Coeficiente de Absorção Normal
- NCM – Nomenclatura Comum do Mercosul
- NRC – Coeficiente de Redução Acústica (*Noise Reduction Coefficient*)
- PET – Polietileno tereftalato
- RAC Coeficiente de Absorção Randômico (*Randomic Acoustical Coefficient*)
- TEP – Tonelada Equivalente de Petróleo
- TCAC – Taxa de Crescimento Anual Composta
- CFM – Pés cúbicos por minuto (*Cubic Feet Minute*)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	MOTIVAÇÃO – A INDÚSTRIA DO NãOTECIDO .....	15
1.2	CONSUMO DE FIBRAS SINTÉTICAS NO BRASIL .....	18
1.3	OBJETIVOS .....	19
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>21</b>
2.1	ACÚSTICA URBANA NA SOCIEDADE MODERNA.....	21
2.2	FIBRAS TÊXTEIS USADAS COMO ISOLANTES ACÚSTICOS .....	22
2.3	PRODUÇÃO DE NãOTECIDO.....	25
2.4	DEFINIÇÃO DE ACÚSTICA .....	33
<b>2.4.1</b>	<b>Fatores que influenciam na absorção acústica</b> .....	<b>35</b>
2.4.1.1	<i>Espessura do nãotecido</i> .....	37
2.4.1.2	<i>Seção transversal da fibra</i> .....	38
2.4.1.3	<i>Resistência ao fluxo de ar (permeabilidade) e porosidade</i> .....	38
2.4.1.4	<i>Tortuosidade</i> .....	39
2.4.1.5	<i>Densidade</i> .....	40
2.4.1.6	<i>Compressão</i> .....	40
2.5	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO ACÚSTICA .....	41
<b>2.5.1</b>	<b>Método da Câmara Reverberante</b> .....	<b>42</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Método do Tubo de Impedância</b> .....	<b>42</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Relação entre os coeficientes obtidos pelo método do tubo de impedância e câmara reverberante</b> .....	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>45</b>
3.1	MATERIAIS .....	45
<b>3.1.1</b>	<b>Fibras</b> .....	<b>45</b>
3.2	MÉTODOS .....	45

<b>3.2.1</b>	<b>Caracterização das fibras .....</b>	<b>46</b>
3.2.1.1	<i>Determinação da densidade linear das fibras.....</i>	47
3.2.1.2	<i>Análise de microscopia eletrônica de varredura das fibras.....</i>	48
<b>3.2.2</b>	<b>Produção dos nãotecidos.....</b>	<b>48</b>
3.2.2.1	<i>Determinação da resistência à tração das amostras de nãotecidos .....</i>	51
3.2.2.2	<i>Ensaio de permeabilidade ao ar das amostras de nãotecidos .....</i>	52
3.2.2.3	<i>Ensaio de absorção acústica das amostras de nãotecidos.....</i>	53
3.2.2.4	<i>Avaliação de produtividade das amostras de nãotecidos .....</i>	55
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
4.1	<b>CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE POLIÉSTER .....</b>	<b>56</b>
4.1.1	<b>Densidade linear .....</b>	<b>56</b>
4.1.2	<b>Características morfológicas .....</b>	<b>59</b>
4.2	<b>FORMAÇÃO DO NÃOTECIDO .....</b>	<b>60</b>
4.2.1	<b>Resistência à tração das amostras de nãotecidos.....</b>	<b>62</b>
4.2.2	<b>Permeabilidade ao ar das amostras de nãotecidos .....</b>	<b>67</b>
4.2.3	<b>Absorção acústica das amostras de nãotecidos.....</b>	<b>68</b>
4.2.4	<b>Análise de produtividade das amostras de nãotecido .....</b>	<b>72</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO A – Tabela de relação entre massa e resultado esperado fornecido pelo fabricante do equipamento. ....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os têxteis técnicos estão continuamente ultrapassando a barreira da tradicional utilização de têxteis, no vestuário e no segmento de cama, mesa e banho, podendo substituir outros materiais como papel, plásticos, filmes, membranas, metais, cerâmicas, vidro, entre outros. O que a maioria dos materiais têxteis apresentam em comum são propriedades provenientes da manipulação de fibras, tecidos e acabamentos, bem como a compreensão de como todos interagem e se comportam em diferentes combinações e ambientes (HORROCKS; ANAND, 2000).

O termo têxtil técnico pode ser definido como materiais e produtos têxteis fabricados, principalmente, devido às suas propriedades técnicas e de desempenho, em detrimento de seus atributos estéticos ou relacionados a decoração (HORROCKS; ANAND, 2000; MUHAMMAD, 2009). De acordo com a principal feira de comércio internacional de têxteis técnicos que ocorre na Alemanha, a *Techtextil Messe Frankfurt*, os têxteis técnicos podem ser aplicados em 12 principais segmentos conforme apresentado no Quadro 1 (MUHAMMAD, 2009).

Quadro 1 – Segmentos e aplicações dos têxteis técnicos.

<b>Segmento</b>	<b>Aplicação dos têxteis técnicos</b>
<i>Agrotech</i>	Materiais aplicados na agricultura, aquicultura, fruticultura e silvicultura;
<i>Buildtech</i>	Construção civil;
<i>Clothtech</i>	Componentes técnicos para calçados e vestuário com desempenho específico;
<i>Geotech</i>	Geotêxteis e aplicações na engenharia civil (estradas, proteção de declives) e na engenharia ambiental (aterros sanitários);
<i>Indutech</i>	Filtração, transporte, limpeza e outros usos industriais;
<i>Homotech</i>	Componentes técnicos para mobiliário, têxteis lar e revestimentos;
<i>Medtech</i>	Materiais aplicados na higiene pessoal e medicina;
<i>Mobiltech</i>	Aplicação em automóveis, transporte marítimo, ferroviário e aeroespacial;
<i>Oekotech</i>	Proteção ambiental;
<i>Packtech</i>	Mais diversas embalagens, usadas na agricultura, indústria, entre outros;
<i>Protech</i>	Proteção pessoal e patrimonial;
<i>Sportech</i>	Materiais e produtos aplicados no esporte e lazer.

Fonte: Adaptado de Muhammad (2009).

Dentre os diversos substratos utilizados na área de têxteis técnicos destacam-se os não tecidos, que são definidos conforme a NBR 13370/2017 (ABNT, 2017) como uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras, ou filamentos, orientados

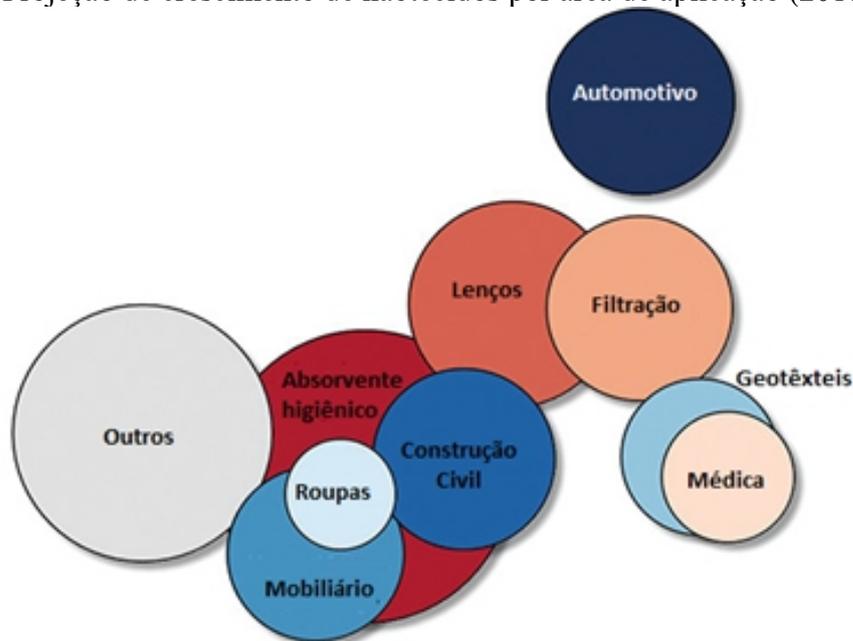
direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão), ou pela combinação destes.

### 1.1 MOTIVAÇÃO – A INDÚSTRIA DO NÃO TECIDO

É incrível acreditar que a indústria multibilionária dos não tecidos teve o seu início definido como moderno apenas cinquenta anos atrás. Até a última década, a indústria de não tecidos estava concentrada principalmente na Europa, América do Norte e Japão, pois foram nessas regiões que ela foi concebida e desenvolvida (METISSUE, 2020). Segundo a Associação da Indústria de Não tecidos (INDA) e a Associação Europeia de Descartáveis e Não tecidos (EDANA) a produção mundial de não tecidos atingiu US\$ 56,2 bilhões em 2018. Além disso, estima-se que a produção mundial de não tecidos continuará crescendo. Espera-se que no período de 2018 a 2023, a indústria se expanda a uma taxa média anual de 4,8%.

Ao atender às necessidades fundamentais e mais sofisticadas, os produtos à base de não tecido trazem valor e benefícios para a sociedade em uma variedade de aplicações, desde cuidados pessoais a saúde, filtração, transporte, construção e vestuário, conforme apresentado na Figura 1 (METISSUE, 2020).

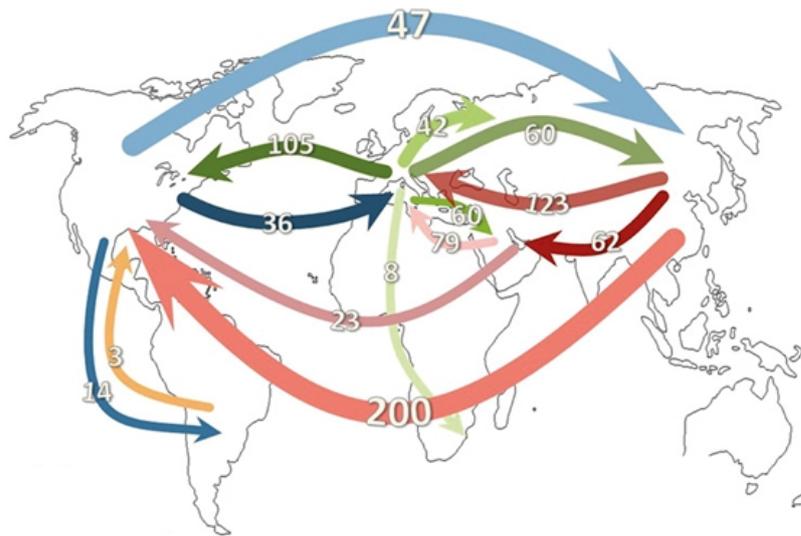
Figura 1 – Projeção de crescimento de não tecidos por área de aplicação (2018-2023).



Fonte: Adaptado de Metissue (2020).

A indústria de não tecidos é verdadeiramente global. Conforme apresentado na Figura 2, as setas representam o volume em mil toneladas de não tecidos comercializados entre cada região do mundo. Verifica-se que as perspectivas da indústria mundial de não tecidos continuam a ser favoráveis (METISSUE, 2020; HEJAZI et al., 2017; RAGHVENDRA; SRAVANTHI, 2017).

Figura 2 – Fluxo internacional de não tecidos 2018 (1000 toneladas).

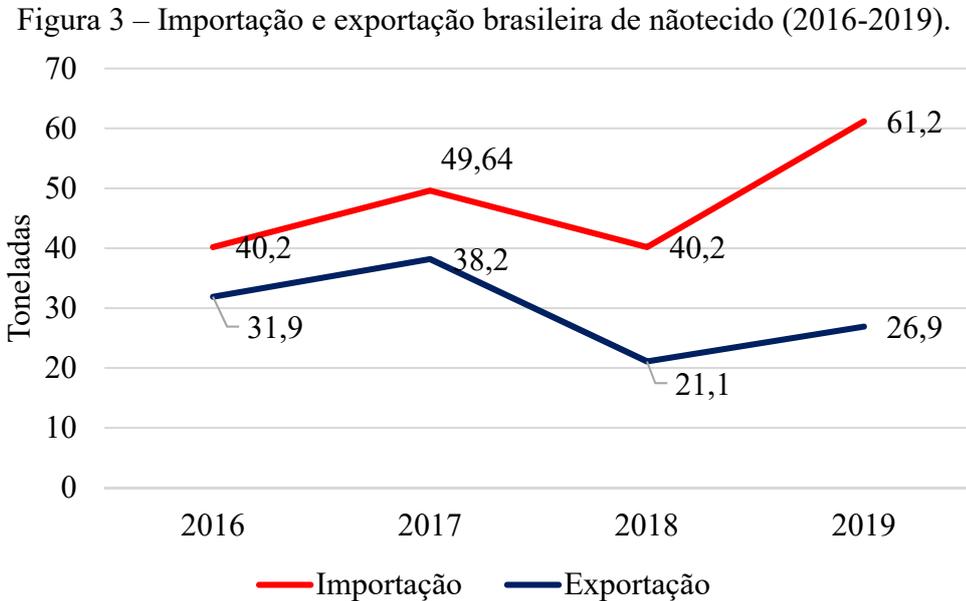


Fonte: Adaptado de Metissue (2020).

Na última década, entre os anos de 2008 e 2018, a quantidade em toneladas de não tecidos produzidos aumentou em uma taxa média anual de 5,7% (METISSUE, 2020). A Ásia é a maior produtora, respondendo por 45,5% da produção mundial em 2018. A China é responsável por uma proporção significativa do volume asiático, totalizando aproximadamente 76%. Atualmente, é um dos mais importantes produtores mundiais de não tecidos. Em 2018, a China exportou 964.000 toneladas, quase 4 vezes mais do que em 2008. A produção de não tecidos da região da América do Sul, após experimentar um crescimento anual de 6,2% na última década (entre 2008 e 2018), tem previsão de crescimento de 4,2% ao ano, durante o período de 2018 a 2023 (METISSUE, 2020).

Conforme o relatório de importação e exportação de não tecidos publicado pela Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos (ABINT) em agosto de 2020, o Brasil está importando mais não tecido do que exportando (ASDRUBALI et al, 2015). O que demonstra claramente um aumento na demanda interna do país por não tecidos, em especial em 2018 e

2019, onde esta diferença aumentou e permanece crescente (ABINT, 2020). Na Figura 3 apresenta-se dados referente a importação e exportação do Brasil de não tecidos.



Fonte: Adaptado de ABINT (2020).

No Brasil, a produção de não tecidos cresceu 0,4% em 2019 em relação ao ano anterior, alcançando 277,6 mil toneladas. Já o consumo brasileiro de não tecido em 2019, registrou 312.158 toneladas, equivalendo ao valor de US\$ 1 bilhão. Os segmentos de aplicação de não tecidos duráveis (automotivo, construção civil, vestuário, geotêxteis, industrial, varejo e calçados) representaram 40% do mercado total, o que corresponde aproximadamente a 123.009 toneladas. O consumo do setor de descartáveis, relacionado a higiene e produtos médicos, foi de aproximadamente 189.149 toneladas (ABINT, 2021).

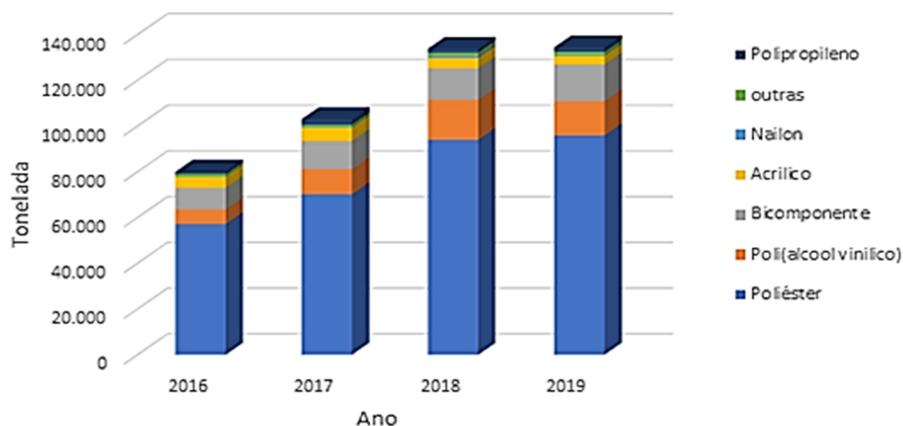
Referente à tecnologia de formação utilizada, a indústria brasileira de não tecidos produziu em 2019, 144,5 mil toneladas de não tecidos, pelo método de fusão. Enquanto isso, a técnica a seco, produziu cerca de 134 mil toneladas (ABINT, 2021).

O Brasil registra consumo de não tecidos per capita ao ano de 1,63 Kg.hab<sup>-1</sup>. Trata-se de uma indústria que entre 2014 e 2015 investiu mais de US\$ 120 milhões. Os investimentos previstos para os próximos anos estão estimados em cerca de US\$ 30 milhões (BENATTO, 2016).

## 1.2 CONSUMO DE FIBRAS SINTÉTICAS NO BRASIL

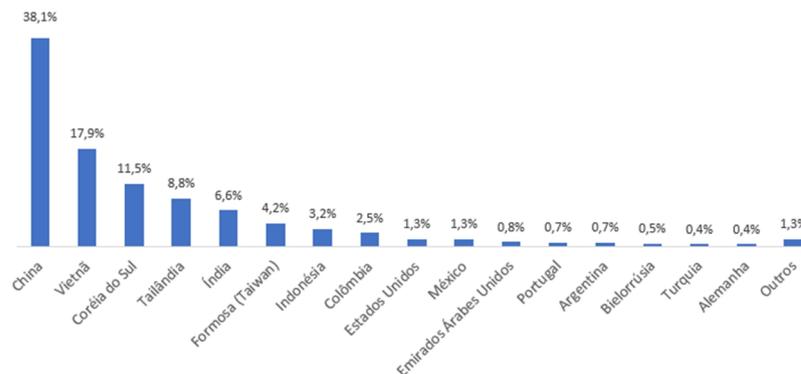
O consumo de fibras sintéticas vem aumentando significativamente a nível mundial, e o mesmo comportamento ocorre no Brasil. Isto pode ser comprovado pelo crescimento das importações de fibras sintéticas, e em especial a fibra de poliéster, popularmente conhecida como PET. Como pode ser verificado na Figura 4, a importação de fibra de poliéster no Brasil teve um aumento de 67% em apenas quatro anos, partindo de 57,2 mil toneladas em 2016 para 95,9 mil toneladas em 2019 (PENTA TRANSACTIONS, 2020). A Ásia é considerada um dos maiores fornecedores de fibras sintéticas para o Brasil, onde países como China, Vietnã, Coréia do Sul, Tailândia e Índia representam, juntas, 82,9% das importações (PENTA TRANSACTIONS, 2020). Na Figura 5 apresenta-se o desempenho geral do Brasil na importação de fibras sintéticas.

Figura 4 – Importação brasileira de fibras sintéticas (2016-2019).



Fonte: Adaptado de Penta transactions (2020).

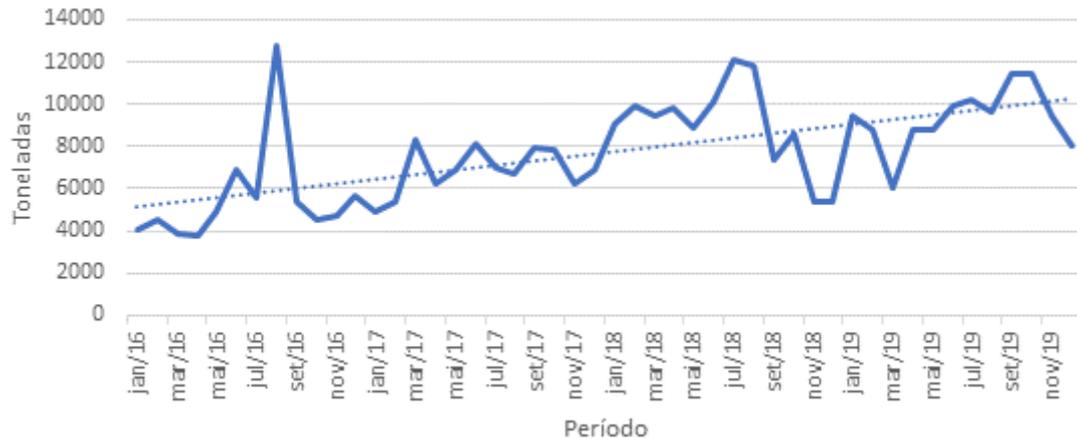
Figura 5 – Importação brasileira de fibras sintéticas por país de origem (2019).



Fonte: Adaptado de Penta transactions (2020).

Analisando isoladamente o aumento de fibra de poliéster no Brasil, pode-se notar mais claramente a sua tendência de crescimento no decorrer dos anos, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Importação brasileira de fibra poliéster (2016-2019).



Fonte: adaptado de Penta transactions (2020).

Verifica-se, portanto, que a indústria de não-tecido é muito promissora, não apenas no Brasil, mas no mundo inteiro, visto as tendências globais deste segmento, que pode ser aplicado em diferentes áreas. Importante também verificar, que o consumo de fibras, notadamente de poliéster, também tem merecido destaque nos últimos anos.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a influência na absorção acústica causada pela variação da quantidade das camadas de véus de não-tecido de poliéster durante sua formação, pelo método cardado, utilizando dobrador horizontal, permanecendo a densidade e espessura constante.

#### 1.3.1 Objetivos específicos

Para responder ao objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a permeabilidade ao ar, conforme a variação da quantidade das camadas de véus de não-tecido;

- Avaliar a influência da quantidade de camadas do não tecido em relação a resistência a tração;
- Determinar o coeficiente de redução acústica (NRC) do não tecido, conforme a variação na quantidade das camadas de véus que o compõe pelo método de impedância;
- Avaliar a melhor relação absorção acústica e velocidade de produção do não tecido, otimizando assim, a produtividade do processo de formação do não tecido.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 ACÚSTICA URBANA NA SOCIEDADE MODERNA

Com o aumento das concentrações urbanas, a necessidade de redução do ruído vem se tornando uma prerrogativa à saúde humana. O ruído gradualmente afeta negativamente o dia a dia das pessoas, podendo causar vários problemas físicos e psicológicos (CARVALHO et al., 2012).

Com a entrada em vigor no Brasil da norma NBR 15575/2013 (ABNT, 2013), a qual está atrelada ao desempenho em edificações habitacionais, a indústria de não tecidos investiu na produção de produtos que proporcionem melhor desempenho térmico e acústico em empreendimentos imobiliários, comparado aos que utilizam paredes de concreto. Esse comportamento está vinculado ao fato de que esta normativa estabelece índices de isolamentos mínimos necessários para as edificações. Além disso, a NBR 16832/2020 (ABNT, 2020) estabelece requisitos para a utilização do não tecido em poliéster em paredes de *drywal*. Como é o caso dos Estados Unidos, onde é comum o uso de não tecido em paredes de vedação de *drywall*, atuando como isolante acústico (BENATTO, 2016).

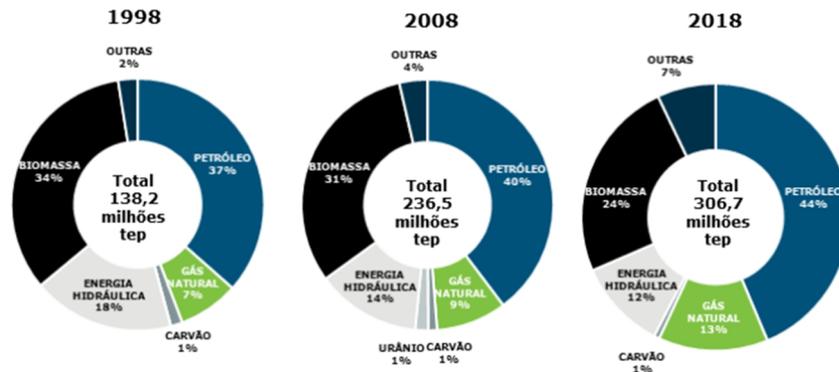
Nesse sentido, o uso eficiente de materiais de isolamento é importante para a redução do impacto do ruído urbano para a população. Estima-se que cerca de 65% dos cidadãos europeus são expostos a níveis de ruído que se espera ter efeitos adversos na saúde humana (ASDRUBALI et al., 2015).

Em todo o mundo, entre 30 a 40 % de toda a energia primária é usada em edifícios. Só na última década no Brasil, o consumo de energia primária cresceu de 236 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) para 306 milhões, conforme estimativa do Instituto Brasileiro do Petróleo e Gás (IBP). Em 2018, o petróleo e o gás natural responderam por 47% da oferta de energia primária no Brasil. O gás natural foi a fonte com maior expansão, quintuplicando nos últimos 20 anos, como apresentando na Figura 7 (IBP, 2020).

Com a introdução de novas tecnologias construtivas cada vez mais industrializadas e com a necessidade do consumo de recursos naturais otimizados, a exemplo de técnicas como *wood* e *steel frame* a procura por materiais isolantes, torna-se cada vez mais necessária. A exemplo do que consta no manual da Associação Brasileira do *Drywall*, onde é apresentado alguns sistemas construtivos, sem e com preenchimento atenuante no interior das paredes,

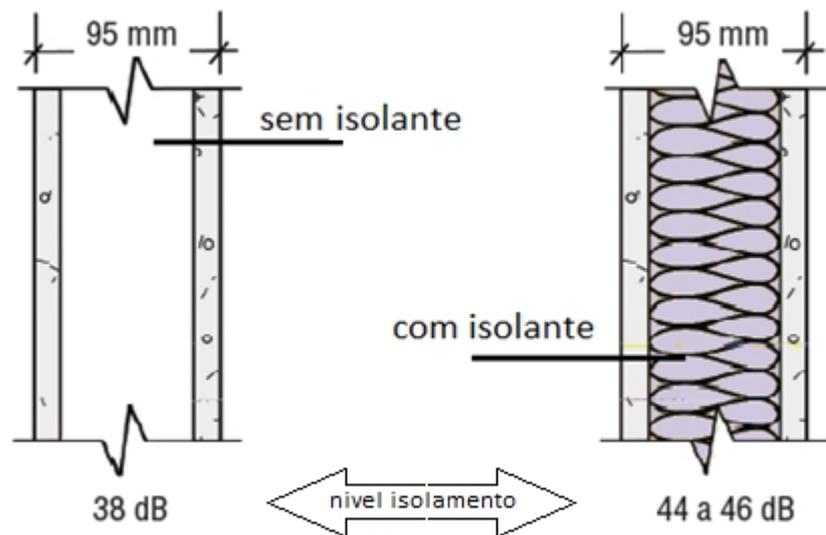
verifica-se que com material de enchimento ocorre um isolamento em torno de 45 dB, que é superior ao modelo sem isolamento Figura 8 (Associação Brasileira do *Drywall*, 2020).

Figura 7 – Evolução da produção de energia primária no Brasil (1998, 2008 e 2018).



Fonte: Adaptado de IBP (2020).

Figura 8 – Comparativo entre paredes *drywall* sem e com material isolante.



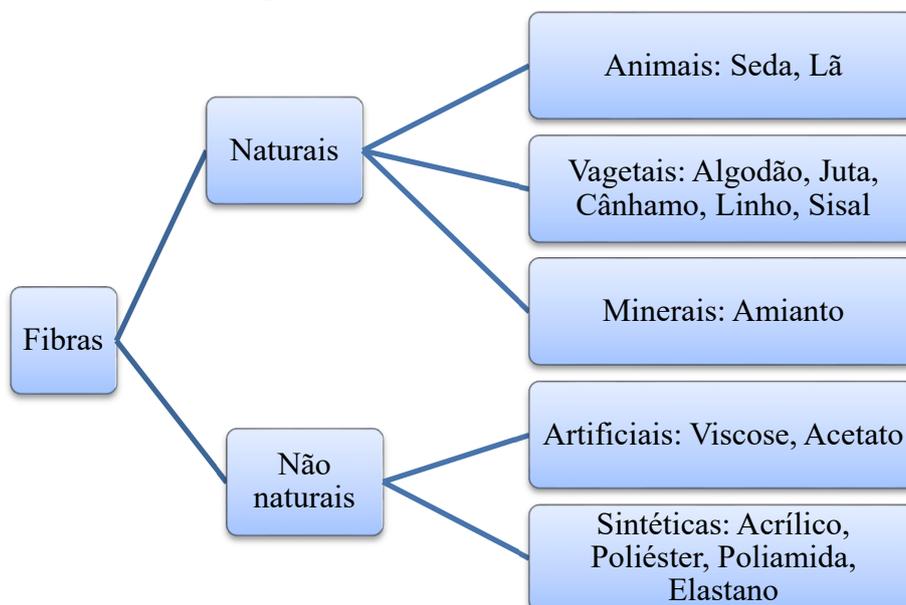
Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de *Drywall* (2020).

## 2.2 FIBRAS TÊXTEIS USADAS COMO ISOLANTES ACÚSTICOS

As fibras têxteis podem ser divididas e classificadas conforme demonstrado na Figura 9. Atualmente, as fibras minerais correspondem a aproximadamente 50% do mercado de isolantes acústico e térmicos, e as sintéticas em torno de 40%. Porém, o manuseio de fibras naturais de origem mineral pode provocar dermatites quando em contato com a pele (SEGURA-ALCARAZ et al., 2018). Além disso, os produtos à base de fibra de vidro, considerados

substitutos do amianto, também são conhecidos por seus efeitos cancerígenos (PATNAIK et al., 2015).

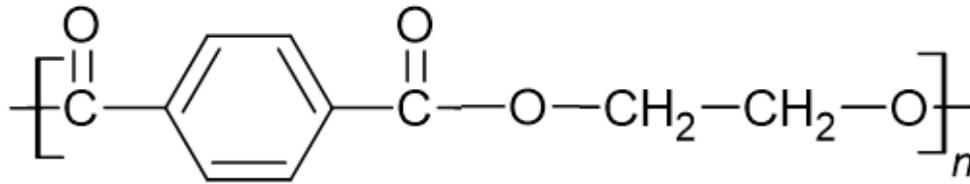
Figura 9 – Classificação das fibras têxteis.



Fonte: Adaptado de Alcantara e Daltin (1996).

O PET, fibra sintética, é considerado um dos mais inovadores polímeros das últimas duas décadas, normalmente usado na produção de embalagens, desde filmes para contenção de alimentos a injeção de garrafas (INTIMI; KÜHTZ, 2011). Atualmente, o PET é produzido por dois métodos, por transesterificação do tereftalato de dimetil com etilenoglicol (EG) e também, por esterificação direta do ácido tereftálico com etilenoglicol (BERTOLOTTI et al., 2015). A obtenção do poliéster ocorre por meio da reação do ácido tereftálico (DTM) com o etileno glicol a quente na presença de catalizadores. A policondensação exige um período entre 5 a 8 horas, sendo efetuada sob pressão reduzida numa temperatura próxima a 300 °C, para que o polímero fique suficientemente fluido. A pureza do DTM, e o uso de catalizadores específicos permite a atuação mais direta sobre o etileno glicol. O polímero obtido no fim da policondensação é solidificado por jatos de água fria e cortado em grãos regulares que apresentam muitas vezes uma forma cúbica (ALCANTARA; DALTIM, 1996). Como o próprio nome sugere, o poliéster é um produto formado por vários grupos químicos chamados ésteres (-CO-O-). Existem vários tipos de poliésteres, porém o mais comum e comercial é o obtido pela reação do ácido tereftálico e o etileno glicol, conforme apresentado na Figura 10 (BERTOLOTTI et al., 2015).

Figura 10 – Fórmula química do PET.

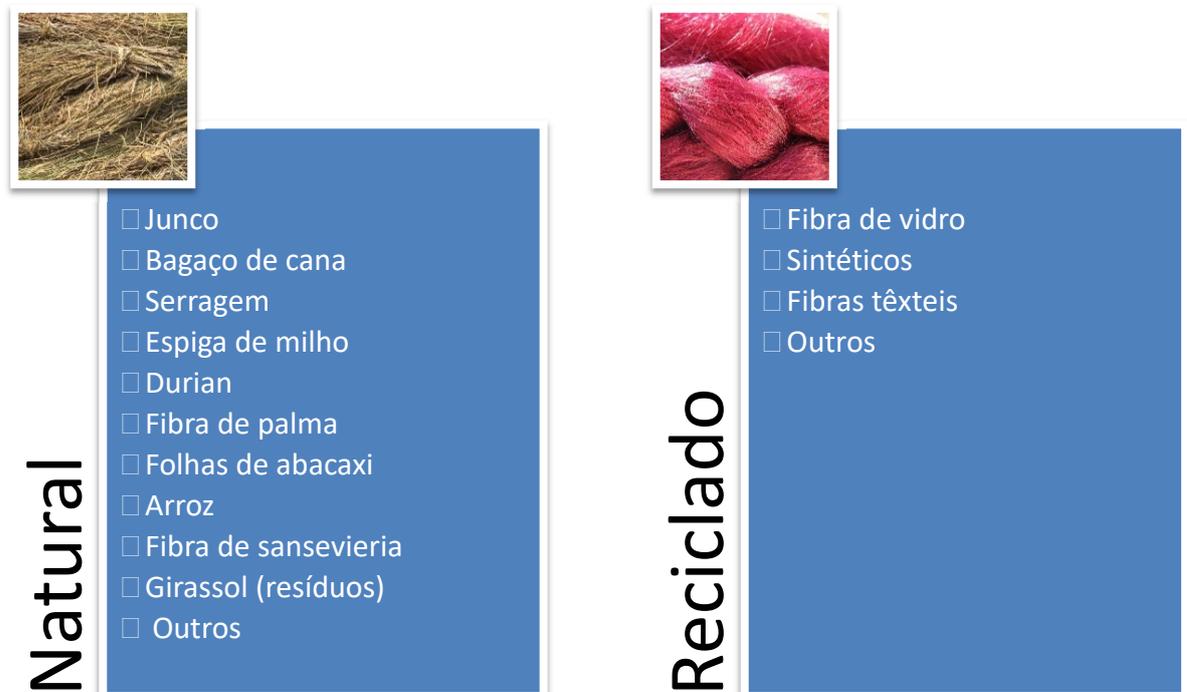


Fonte: Adaptado de Intmi;Kühtz (2011).

A utilização de materiais têxteis a base de fibra de poliéster apresenta algumas vantagens, tais como a baixa densidade por área, flexibilidade, facilidade de preencher elementos construtivos, e excelentes propriedades estéticas (PATNAIK et al., 2015).

Devido ao aumento de normas reguladoras, a utilização de materiais ambientalmente corretos tem se tornado cada vez mais requisitado. O mesmo tem ocorrido com a introdução do termo “sustentabilidade” nas construções, especificamente para isolamento acústico, procurando-se pela utilização de matérias-primas naturais ou recicláveis. Na Figura 11 apresenta-se as principais fibras utilizadas associadas com essas características (HORROCKS; ANAND, 2000).

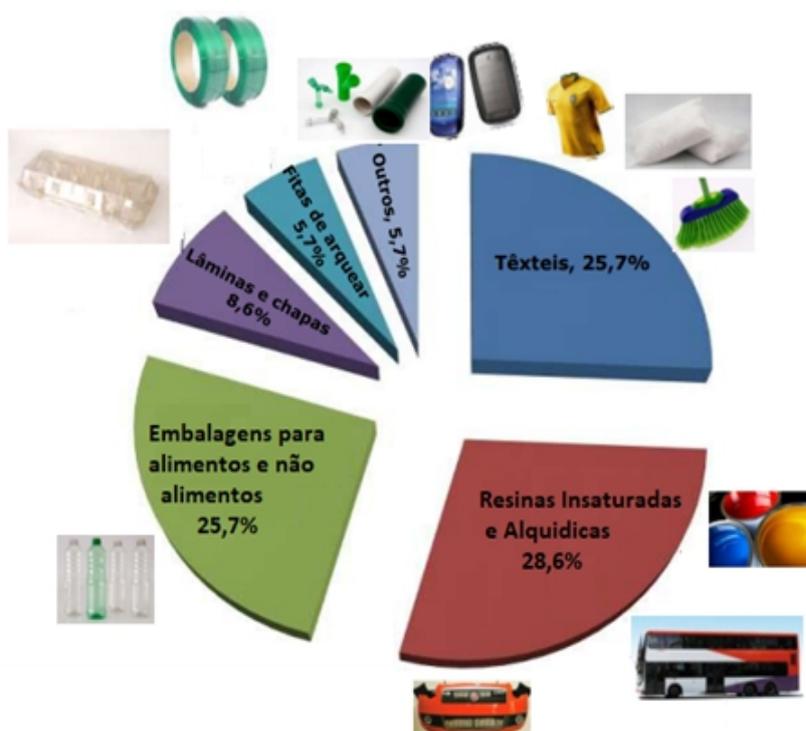
Figura 11 – Fibras naturais e recicladas utilizadas na produção de materiais para isolamento acústico.



Fonte: Adaptado de Horrocks;Anand (2000).

As fibras de PET reciclado (RPET) são derivadas do pós-consumo de garrafas plásticas, que são consideradas um grande potencial de matéria-prima (PATNAIK et al., 2015). De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), em 2015, o Brasil reciclou 274 toneladas de PET, o que representou uma taxa de reciclagem de aproximadamente 50%. Deste montante, em torno de 25% destina-se a indústria têxtil, sendo utilizada em fibras (41%), não tecidos (16%), cordas (15%), cerdas de vassouras e escovas (5%), entre outros produtos (4%) (ABIPET, 2016; SPINACÉ; PAOLI, 2005). Na Figura 12, apresenta-se as diferentes utilizações de RPET.

Figura 12 – Utilização final RPET.

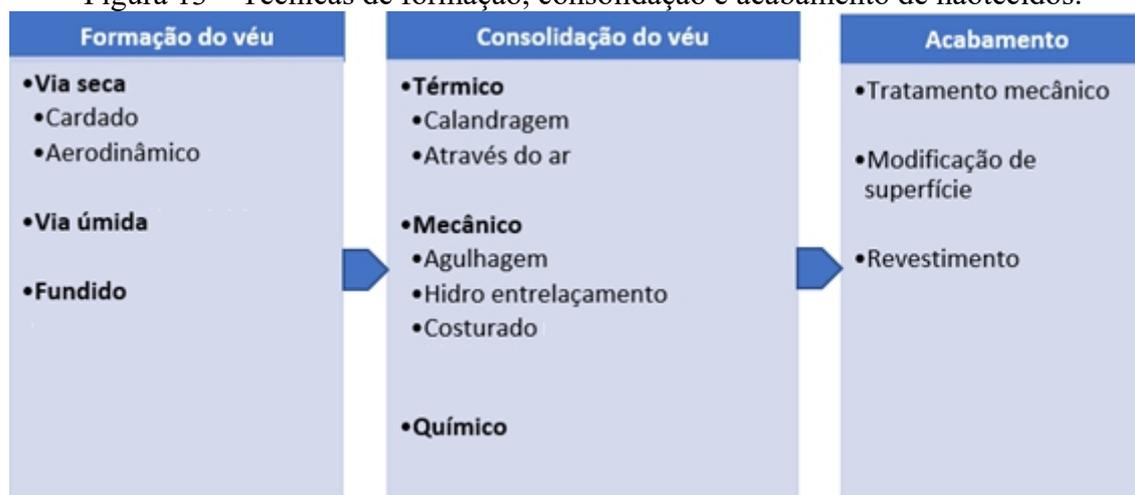


Fonte: Adaptado de ABIPET (2016).

### 2.3 PRODUÇÃO DE NÃOTECIDO

A tecnologia de formação de não tecidos é dividida em três grandes segmentos: via seca; via úmida; e por fusão (também conhecida como fiação direta ou fundida) (RUSSELL, 2007). Na Figura 13 apresenta-se os principais métodos de formação, consolidação e acabamentos dos véus no processo de produção do não tecido.

Figura 13 – Técnicas de formação, consolidação e acabamento de não tecidos.

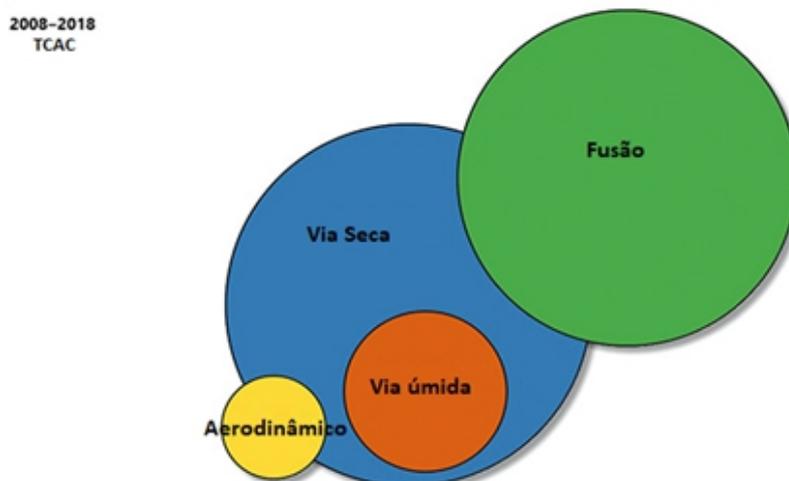


Fonte: Adaptado de EDANA (2020).

O sistema de formação por via seca refere-se ao transporte das fibras por meios mecânicos (cardagem) ou pelo ar (sistemas de formação pneumáticos/aerodinâmicos). O sistema de formação por via úmida utiliza água como meio de transporte. As fibras depositadas com água formam uma massa fibrosa, a partir da qual parte do fluido é retirado mecanicamente e o restante através de calor, para criar uma ligação de hidrogênio com a pasta celulósica; ou secar e polimerizar o ligante aplicado ocorrendo assim a consolidação. Esta técnica é muito utilizada para a produção de materiais de baixa gramatura, como lenços descartáveis. O método de fiação direta, por fusão ou fundida, como também é chamado, para fabricação de não tecido, resume-se a recepção das fibras por uma esteira de transporte ou tela, após terem sido extrusadas por fieiras. Este processo é utilizado, por exemplo, na produção de geotêxteis. A seguir a etapa de formação, ocorre a etapa de consolidação, onde véu pode ser consolidado por processos químicos, mecânicos ou térmicos, de acordo com as propriedades do produto final (REWALD, 2016).

Referente aos índices produtivos, os processos por fusão e a seco foram responsáveis pela maior parte da produção mundial de não tecidos em 2018, totalizando 87% do total gerado em toneladas. Na Figura 14 apresenta-se a projeção de crescimento de não tecidos, onde utiliza a taxa de crescimento anual composta (TCAC), tendo no eixo das coordenadas o período entre 2008 à 2018, e no eixo das abscissas a previsão de crescimento entre o período de 2018 a 2023. O tamanho das bolhas refere-se à produção em toneladas em 2018, demonstrando a projeção de crescimento dos não tecidos.

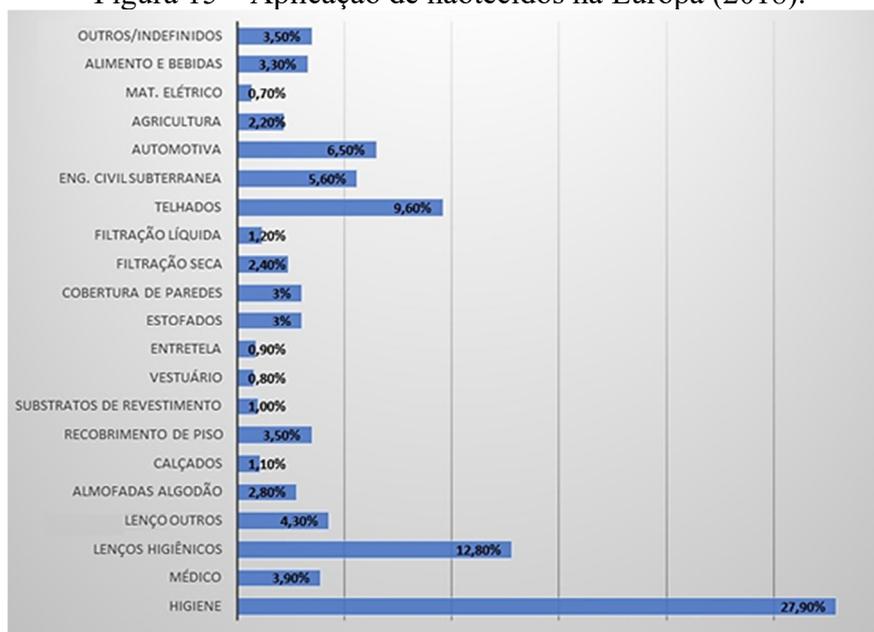
Figura 14 – Projeção de crescimento de nãotecidos de acordo com a tecnologia de formação (2018-2023).



Fonte: Adaptado de Metissue (2020).

A produção mundial de nãotecidos pelo processo a seco, incluindo todos os processos de consolidação, apresentou um crescimento considerável entre os anos de 2008 a 2018, aumentando 5,2% ao ano. Já a produção de nãotecidos pelo processo por fusão, no mesmo período mencionado, teve um crescimento médio de 7,3% ao ano (METISSUE, 2020). Na Figura 15 apresenta-se algumas aplicações de nãotecidos especificamente na Europa, seguido do percentual.

Figura 15 – Aplicação de nãotecidos na Europa (2018).

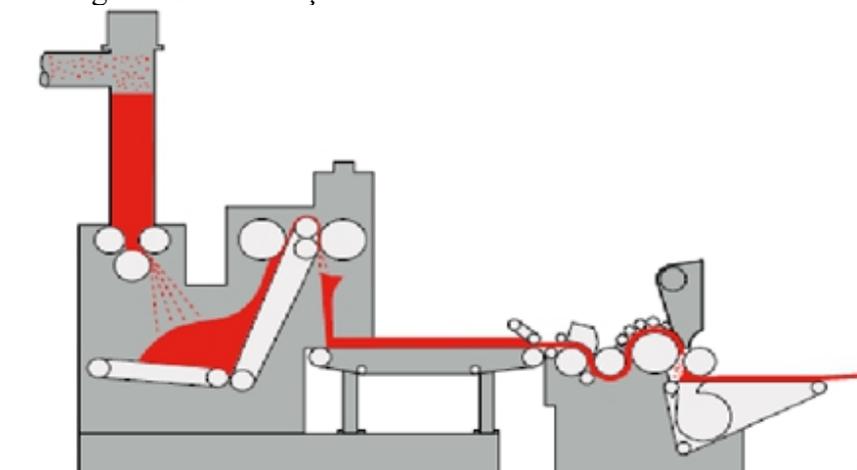


Fonte: Adaptado de EDANA (2020).

A partir da análise da Figura 15, verifica-se que a utilização de não tecidos na construção civil é bem diversificada. Somando-se a aplicação em telhados (9,6%), recobrimento de pisos (3%), cobertura de paredes (3,5%), engenharia civil subterrânea (5,6%), totaliza-se um percentual de 21%, ficando atrás apenas para os lenços higiênicos (27,9%).

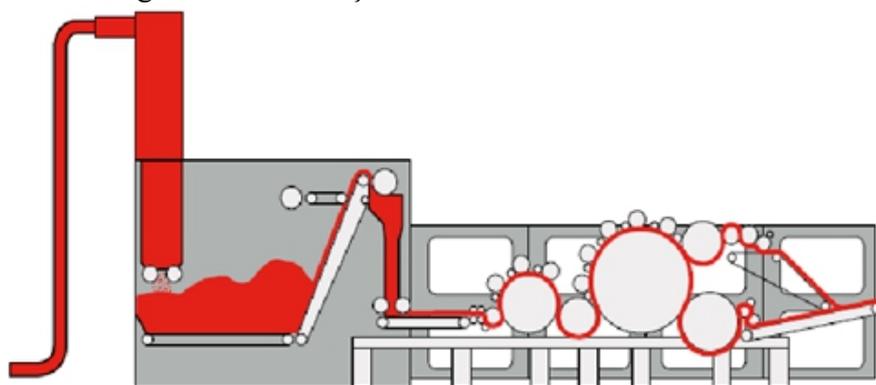
O processo de formação do não tecido via seca é dividido em dois grandes grupos: aerodinâmico, também chamado de *airlay*, e cardado, respectivamente ilustrados na Figura 16 e na Figura 17 (RUSSELL, 2007).

Figura 16 – Formação de não tecido via seca aerodinâmico.



Fonte: Adaptado de AUTEFA (2020).

Figura 17 – Formação de não tecido via seca cardado.



Fonte: Adaptado de AUTEFA (2020).

A formação de véu aerodinâmico consiste basicamente em utilizar ar com a finalidade de dispersar as fibras de forma aleatória, formando conseqüentemente um véu randômico e com propriedades isotrópicas. No final do processo, a fibra é depositada sobre uma esteira, onde o ar é succionado, formando assim o não tecido já normalmente pronto no que se refere a

gramatura e espessura (RUSSELL, 2007). Neste processo não existe a formação ou sobreposição de camadas de não tecido.

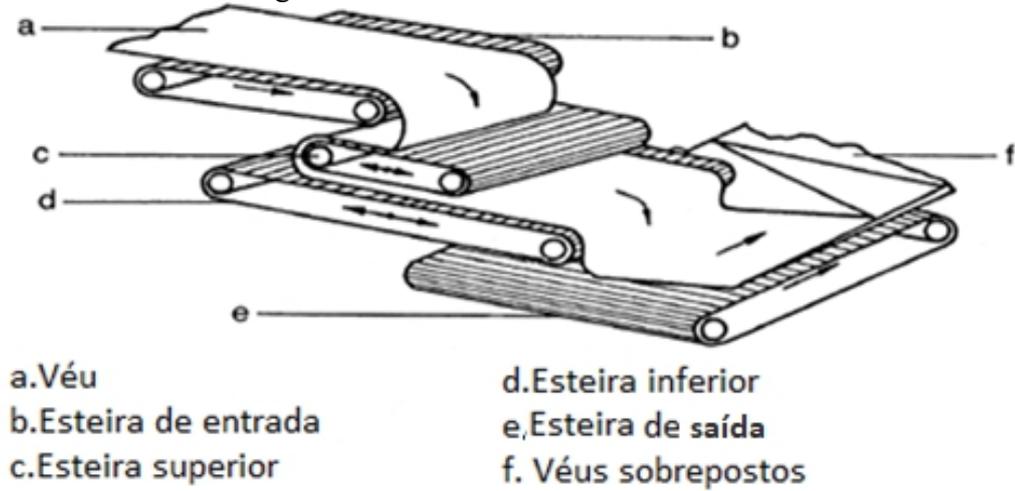
Já a formação de véus por cardagem consiste na abertura das fibras formando um véu fino, homogêneo, com fibras paralelas na direção do equipamento, conseqüentemente com propriedades anisotrópicas. Este véu apresenta normalmente baixa gramatura. Dos três processos de formação de não tecidos (a seco, úmido e por fusão), o mais comumente utilizado e com a finalidade acústica é o por via seca (RAGHVENDRA; SRAVANTHI, 2017; RUSSELL, 2007).

As cinco funções essenciais do equipamento de carda, equipamento utilizado no processo a seco, são: (i) alimentar o equipamento constantemente de fibras por unidade de tempo em relação ao seu comprimento e largura; (ii) limpar e remover corpos estranhos, sujeiras e fibras curtas; (iii) abrir as fibras com o mínimo de tensão; (iv) organizar as fibras em uma orientação paralela e formar no final do processo o véu (NASSAR, 2010).

Como mencionado, o véu obtido pelo processo de cardagem apresenta baixa gramatura e sua espessura é reduzida. Neste momento é que o dobrador de véus é empregado no processo de formação do não tecido (Figura 18). Este equipamento consiste na transferência contínua do véu a partir de um sistema de correias transportadoras que apresentam um movimento de vaivém (Figura 18c e d) com o propósito de sobrepor o véu resultante da carda em várias camadas em uma esteira (Figura 18e), movendo-se em ângulo reto em relação a saída da carda, formando uma manta na direção cruzada em relação a saída dos véus da carda. Os não tecidos mais espessos e com maior gramatura são produzidos pelo processo de colocação cruzada dos véus, sendo que a gramatura pode variar entre  $50 \text{ g m}^{-2}$  a mais de  $1500 \text{ g m}^{-2}$ . O ângulo da sobreposição das fibras na esteira de saída (transversal) é determinado pela velocidade das esteiras de entrada (alimentação) e de saída (NASSAR, 2010).

O dobrador de véus é parte integrante do processo de formação de não tecidos cardados. O equipamento encontra-se localizado perpendicularmente a saída da carda, entregando o véu em uma esteira na diagonal. Tipicamente o equipamento dobra entre 4 a 15 camadas, conforme a demanda do produto que está sendo desenvolvido (ACIMIT, 2008).

Figura 18 – Dobrador de véus horizontal.



Fonte: Adaptado de Nassar (2010).

Atualmente, há no mercado dobradores de véus com velocidades de esteira de entrada superiores a  $200 \text{ m min}^{-1}$  e com largura de deposição de véus de 9 metros (AUTEFA, 2020). Isso possibilita que os véus formados sejam mais estreitos que o não-tecido produzido. A Figura 19 apresenta as diversas camadas de véus sobrepostos após o dobrador, antes da consolidação.

Figura 19 – Camadas de véus de não-tecido sobrepostas.



Fonte: Autor (2021).

Nesse sentido, é justamente a quantidade de véus de não-tecido sobrepostos durante a formação cardada, proporcionada pelo dobrador de véus, que será estudada do ponto de vista acústico.

Como mencionado anteriormente, após as fibras terem sido abertas na carda, os véus formados e sobrepostos dão origem ao não-tecido, que necessita ser consolidado. Conforme apresentado na Figura 13, existem diferentes métodos de consolidação das fibras após sua formação, consistindo em mecânico, químico e térmico. O processo de consolidação mecânica por agulhagem depende da repetitiva penetração das agulhas, que apresentam saliências, em uma manta fibrosa. Existe também a consolidação mecânica por costura e a que utiliza água (REWALD, 2016).

O processo de consolidação química consiste na aplicação de um agente ligante, normalmente diluído em água (muito comum usar acrílico, butadieno estireno, látex e acetato de vinila). Existem vários métodos de aplicação, os mais usados são foulardagem e pulverização (este último utilizado para a produção de não-tecidos volumosos e com baixa espessura). Independente da técnica de consolidação química utilizada, após a aplicação do agente ligante é necessário realizar a cura e secagem, para remoção da água. Durante a secagem, o material é submetido a temperaturas entre 120 °C a 160 °C por um tempo que varia de 1 a 6 minutos, dependendo da quantidade de água a ser removida e do tipo de ligante usado (NASSAR, 2010).

O sistema de consolidação térmica (*thermobond*) é muito usado nos processos de produção de não-tecidos a seco e em multicamadas. Este processo foi descrito inicialmente em 1942, como um véu formado por fibras termoplásticas e não termoplásticas, onde a partir da introdução de calor as fibras termoplásticas fundiam, ligando-se entre as demais fibras. O processo por termofusão é o mais comum para a consolidação de não-tecidos, por apenas requerer a presença de uma fibra termoplástica (mono ou bicomponente). É possível também inserir componentes termoplásticos nas formas de pó, filme, véu ou adesivo. O processo inicia com a aplicação de calor sobre o componente termoplástico até que sua viscosidade se reduza e ele consiga fluir entre as seções capilares das fibras unindo os seus pontos de contato após o material esfriar, solidificando-se novamente (ACIMIT, 2008).

Comparado com as outras técnicas de consolidação de fibras, o processo térmico traz como benefícios: baixo custo; baixa demanda de energia; não possui material volátil; não é poluente; não utiliza água; e apresenta uma consolidação uniforme (NASSAR, 2010).

No processo de consolidação por termofusão, especificamente quando se trata da formação de véus pelo método a seco cardado, o mais utilizado são as fibras bicomponentes. Estas têm se apresentado mais fáceis de serem processadas e mantêm melhor a composição e características do não-tecido quando comparadas as fibras compostas por um único componente.

No caso de véus compostos por fibras bicomponentes, o polímero exterior não precisa necessariamente estar completamente fundido, mas apenas “amolecido”. Portanto, onde as fibras que compõem o não-tecido se tocam, ou seja, se encontram, são potencialmente fundidas, porém a estrutura física no seu interior não será degradada termicamente, reduzindo assim o encolhimento térmico do véu, porém mantendo sua resistência (ACIMIT, 2008).

Para reduzir a temperatura de fusão de um polímero, como a do poliéster, por exemplo, onde sua temperatura de fusão é de 260 °C, para 135 a 190 °C, é usado o processo de produção de copolímero através da policondensação. A velocidade de fusão deste copolímero é muito elevada e seu encolhimento térmico é considerado baixo. Existem vários tipos de fibras bicomponentes, formados tanto na composição do polímero quanto na morfologia da fibra. A composição pode ser de poliéster e polipropileno, poliéster e polietileno, poliéster e copoliéster, sendo esta última a composição a mais utilizada (PEPELS et al., 2013).

No que se refere a morfologia das fibras bicomponentes, as duas mais encontradas entre as tantas que existem, é “lado a lado” onde os dois polímeros são extrudados, como o próprio nome sugere, um ao lado do outro (Figura 20a). Nesta técnica é importante haver uma boa adesão entre os dois polímeros. Se a configuração geométrica dos dois componentes for assimétrica o processo de termofusão poderá produzir uma crimpagem adicional na fibra em decorrência da diferença de encolhimento entre os dois polímeros. No caso da bicomponente “núcleo-coroa” o material interno é o polímero e o externo o copolímero (Figura 20b). Nesta configuração, a adesão entre os dois componentes não é necessária para a integridade da fibra, tendo como vantagem a facilidade de contato com a parte exterior da fibra. A superfície da fibra apresenta brilho, capacidade de tingimento e maleabilidade (ACIMIT, 2008).

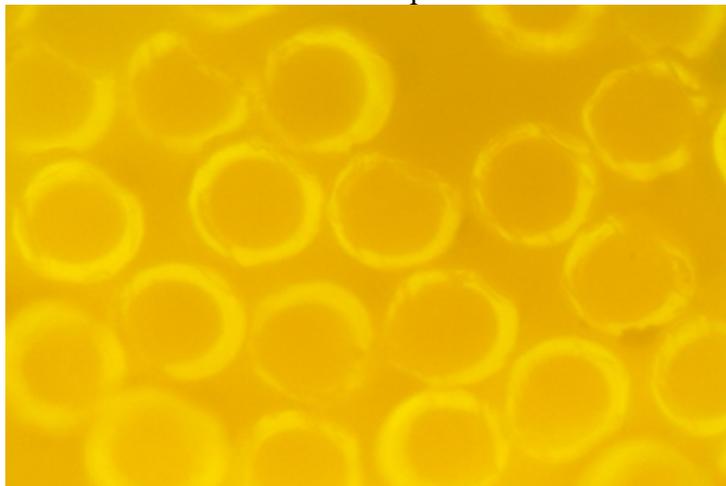
Figura 20 – Morfologia da fibra bicomponente. a) Lado a lado. b) Núcleo-cora.



Fonte: Adaptado de ACIMIT (2008).

Na Figura 21 é possível observar um conjunto de fibras de PET bicomponentes de título 4 dtex do tipo núcleo-coroa, onde o núcleo apresenta coloração mais escura e a coroa mais clara.

Figura 21 – Seção transversal de uma fibra bicomponente núcleo-coroa ampliada 1000 vezes.



Fonte: Autor (2021).

As fibras termoplásticas (bicomponentes) podem representar de 5 a 50% da composição do véu, dependendo das propriedades que se pretende obter no produto final, como maleabilidade ou elevada rigidez, respectivamente (RUSSELL, 2007).

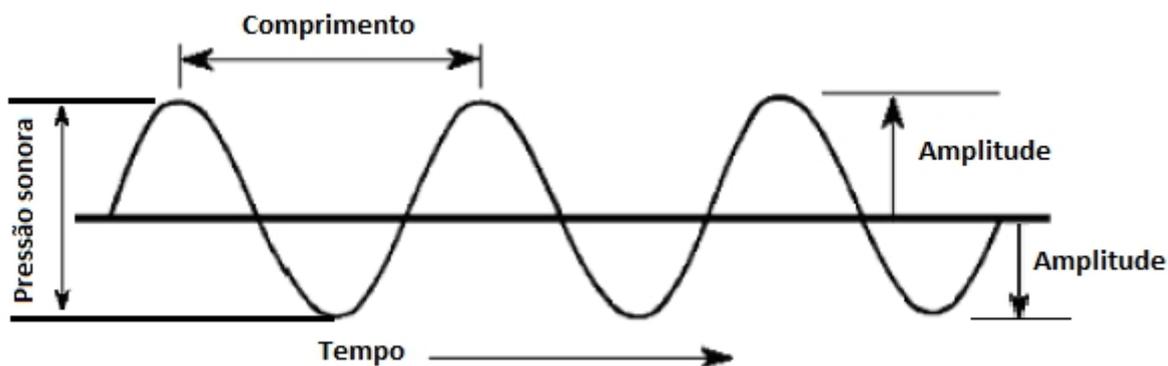
## 2.4 DEFINIÇÃO DE ACÚSTICA

A cerca de 2500 anos atrás, Pitágoras já estudava a relação musical, e escreveu “o fundamento da projeção acústica do anfiteatro no som”. Porém, apenas no final do século XIX e início do século XX é que a acústica se transformou em ciência (MÜLLER, 2009). Portanto, acústica é definida como a ciência que estuda o som, sendo também incluído seus efeitos como reflexão, refração, absorção, difração e interferência (JAYARAMAN, 2005).

O som pode ser considerado como um fenômeno físico e é representado por uma onda longitudinal quando partículas do meio são temporariamente deslocadas na direção paralela ao transporte de energia, e então retornam a sua posição original. A vibração destas partículas e seu deslocamento em ondas relativamente densas, alternadas entre as de menores densidade, resulta na vibração normal ambiente que são percebidas pelo ouvido humano. Uma onda acústica pode ser descrita em termo de suas variáveis como amplitude, frequência,

comprimento, período e intensidade (JAYARAMAN, 2005). Na Figura 22 apresenta-se uma onda de som e seus principais elementos.

Figura 22 – Representação de uma onda de som.



Fonte: Adaptado de Jarayaman (2005).

A amplitude refere-se à altura entre o pico ou vale da onda e o seu ponto zero (eixo), ou seja, a pressão máxima e mínima. A frequência é determinada pelo número de ondas máximo e mínimo que um determinado som produz em uma unidade de tempo. Normalmente, essa frequência é medida em hertz (Hz). O comprimento de onda é a distância que a onda percorre para realizar um ciclo completo, ou seja, entre dois picos ou dois vales. Enquanto isso, período é definido como o tempo em que uma onda realiza um ciclo completo, e a intensidade é verificada como a taxa média de energia acústica, que é transmitida por intermédio de uma unidade de área.

Como uma onda, a velocidade do som é determinada a partir de quão rápido o distúrbio é passado de uma partícula para outra, em condições normais de pressão e umidade ao nível do mar, o som viaja no ar a uma velocidade aproximada de  $344 \text{ m s}^{-1}$ . A absorção do som é resultante da dissipação da energia acústica transformada em energia térmica (calor). O mecanismo de dissipação é quando o som penetra nos poros do material devido à pressão do ar. As moléculas de ar oscilantes interagem com o material conforme a frequência do som. Esta interação resulta em perdas por fricção (JARAYAMAN, 2005). Por este motivo, materiais fibrosos são ótimos agentes de absorção acústica. Entre os diversos substratos que podem ser utilizados destacam-se os nãotecidos (NARANG, 1995).

No Quadro 2 é demonstrado a percepção do ouvido humano às variações do nível de pressão sonora em decibéis (dB).

Quadro 2 – Percepção humana ao nível de som.

Diferença de nível de som [dB]	Percepção humana
1	Pouco percebido
3	Percebido
5	Claramente percebido
10	Duplica a percepção sonora
20	Quadruplica a percepção sonora

Fonte: Adaptado de Müller (2009).

#### 2.4.1 Fatores que influenciam na absorção acústica

Diversos são os fatores que influenciam na absorção acústica dos não tecidos. Há parâmetros relacionados tanto a fibra utilizada, como os que são decorrentes do não tecido produzido. Alguns estudos que mostraram comportamentos relacionados com os fatores atrelados a absorção acústica são apresentados a seguir.

Tascan e Vaughn (2008), estudaram a influência da seção transversal e do título das fibras na absorção acústica, onde demonstram que não tecidos produzidos com fibras de menor título (sistema direto), bem como fibras de seção transversal de maior tortuosidade apresentam uma melhor absorção acústica. Além da influência do título da fibra e da sua seção transversal, os autores estudaram a densidade do não tecido formado. Para isso, utilizaram não tecidos de densidade entre 10 a 100 Kg.m<sup>-3</sup>, variando o título e a seção da fibra. Os resultados mostraram uma conclusão análoga ao estudo anterior, de que quanto maior a tortuosidade da fibra, maior o comprimento da sua seção, e quanto maior a densidade do material maior será absorção acústica.

Em outro estudo Seddeq (2009) avaliou diversos fatores que influenciam na absorção acústica de materiais para este fim, como o tipo de matéria-prima fibrosa (sendo o PET a de maior destaque), a espessura do não tecido e a resistência ao fluxo de ar. Os resultados mostraram que a absorção acústica aumenta à medida que o título das fibras diminui (sistema direto). Além disso, foi observado que uma das mais importantes características que influenciam na absorção acústica é a resistência ao fluxo de ar (além de mencionar a seção transversal das fibras e a densidade do material). Pois quanto maior a tortuosidade, maior a densidade e maior a resistência ao fluxo de ar, e conseqüentemente maior a absorção acústica.

Narang (1995) estudou parâmetros físicos da fibra de poliéster, tais como título da fibra (neste caso em *denier*, que é definido como a massa em gramas de um filamento de 9000 m); tipo da fibra (sólida ou oca); o *crimp* da fibra, ou seja, o número de ondulações por unidade

de comprimento, se é regular (serrilhado) ou conjugado (espiral); e parâmetros do processo, como o tipo de consolidação e o percentual de fibra de ligação ; disposição do véu que forma o não tecido e a gramatura do não tecido formado (sempre considerando o mesmo comprimento da fibra). A conclusão do estudo foi similar a trabalhos prévios. Entretanto, o que chama a atenção, é que o autor menciona que o melhor resultado foi obtido para não tecidos com maior relação massa por unidade de área, ou seja, com gramatura igual ou superior a  $1000 \text{ g.m}^{-2}$ . Segundo o autor, uma importante conclusão do seu trabalho é o novo método de previsão estimada da resistência ao fluxo de ar, onde o número de fibras por volume e o fluxo de ar apresentam uma analogia direta entre eles. Esta relação leva em consideração o diâmetro da fibra envolvida, ou seja, quanto maior o número de fibras por metro cúbico maior é a resistência ao fluxo de ar.

Posteriormente, Segura-Alcaraz et al. (2018) em seus estudos de absorção acústica, desenvolveram materiais híbridos, conjulgando a utilização de tecidos e não tecidos. Foi observado que o uso de tecidos (a partir de diferentes estruturas) combinados com não tecidos de poliéster (produzido a partir de fibras de 63 mm de comprimento e título 12,33 dtex, nas espessuras de 15, 30 e 45 mm, e gramatura de  $160 \text{ g.m}^{-2}$ ), apresentaram ganhos bastante significativos em relação a absorção acústica, à medida que a espessura do não tecido aumentava.

Zhu et al. (2015) avaliaram a absorção acústica de não tecidos variando sua densidade (de 30 a  $90 \text{ Kg.m}^{-3}$ ) e espessura (de 8,49 até 10,15 mm). Para isto foi produzido um não tecido com uma mistura de fibras composta por algodão, poliéster e fibras bicomponentes, em duas composições de misturas diferentes, todas utilizando 20% de bicomponente, porém variando o poliéster e o algodão (20 e 60%; 60 e 20%). Os títulos das fibras foram algodão 3,3 *denier*, poliéster 1,5 *denier*, e fibras bicomponentes com 3,3 *denier*. A conclusão do estudo foi que materiais mais compactados e com maior resistência ao fluxo de ar apresentam maior índice de absorção acústica. As misturas com 20% de poliéster e 60% de algodão apresentaram um melhor resultado de absorção, devido a maior tortuosidade superficial do algodão quando comparado com o poliéster.

Outro estudo utilizou 38 densidades diferentes de não tecidos de poliéster que variaram entre 12 a  $110 \text{ Kg.m}^{-3}$  e espessuras nominais de 10 a 70 mm. Neste trabalho foi utilizado um novo modelo matemático para determinação empírica da resistência ao fluxo, impedância acústica e coeficiente de absorção acústica de não tecidos (GARAI; POMPLI, 2005).

Baseado no avanço dos estudos conduzidos relacionados com os fatores que influenciam na absorção acústica, é possível identificar que diversas são as propriedades das fibras que interferem na absorção acústica dos não tecidos, tais como comprimento, diâmetro, seção transversal da fibra (redonda, trilobal, entre outras), título, tipo de *crimp* da fibra (espiral ou serrilhada), tipo de fibra (oca ou sólida). Além disso, existem também parâmetros intrinsecamente relacionados aos métodos de formação e consolidação do não tecido, tais como, densidade, permeabilidade ao ar, gramatura, espessura (esta última também associada a quantidade de camadas).

Nesse sentido, dentre os diversos fatores que influenciam na absorção acústica dos não tecidos, a seguir apresenta-se os principais.

#### 2.4.1.1 Espessura do não tecido

Na Figura 23, apresenta-se a seção transversal de um não tecido, composta por diversas camadas de véus consolidados. Estas camadas podem ser irregulares, formando zonas com maior e menor população de fibras, conseqüentemente afetando na linearidade da densidade do material. Além disso, afeta também o fluxo de ar e a porosidade entre as camadas (SEDDEQ, 2009).

Figura 23 – Camadas do não tecido.



Fonte: Autor (2021).

A absorção acústica em baixas frequências sonoras tem relação direta com a espessura. A regra consiste que a absorção sonora efetiva de um material poroso é alcançada quando a espessura do mesmo é de cerca de um décimo do comprimento de onda incidente (SEDDEQ, 2009). O aumento da absorção sonora apenas em baixas frequências ocorre quando o material

é mais espesso. Contudo, em frequências mais elevadas, a espessura tem um efeito insignificante na absorção do som (JARAYAMAN, 2005).

#### *2.4.1.2 Seção transversal da fibra*

Existe uma correlação direta entre a absorção acústica e a área superficial da fibra. Quanto maior a sua tortuosidade, maior é o seu poder de absorção acústica. Fibras com seção de maior tortuosidade apresentam uma maior dificuldade ao fluxo de ar quando comparadas com fibras que apresentam a mesma densidade linear (título), porém com seção transversal redonda. Isto se deve a maior interação da onda acústica (moléculas de ar) com a superfície da fibra. Assim, fibras com seção transversal com maior tortuosidade produzem uma maior resistência ao fluxo de ar, portanto uma maior absorção acústica (TASCAN; VAUGHN, 2008).

O aumento do coeficiente de absorção acústica é inversamente proporcional ao diâmetro da fibra. Isto ocorre porque quanto mais finas as fibras, mais material fibroso é requerido numa igual unidade de volume, gerando uma maior tortuosidade, maior fricção das ondas acústicas (moléculas de ar) com as fibras e maior dificuldade ao fluxo de ar (JARAYAMAN, 2005).

Portanto, a absorção acústica de um não tecido produzido com fibras de seção transversal arredondada de 3 *denier* é mais eficiente que a de um não tecido produzido a partir de fibras com mesma seção transversal, porém título superior (15 *denier*), mesmo apresentando a mesma densidade (TASCAN; VAUGHN, 2008).

#### *2.4.1.3 Resistência ao fluxo de ar (permeabilidade) e porosidade*

Este é um dos mais importantes fatores de influência da absorção acústica dos não tecidos. Fibras inter cruzadas nos não tecidos são elementos de fricção que promovem resistência ao movimento da onda acústica. Em geral, quando a onda de som penetra nestes materiais, sua amplitude reduz devido a fricção das ondas de som tentando se mover através das passagens tortuosas do não tecido. Assim, a energia acústica é convertida em calor. Esta quantidade de fricção que pode ser expressa pela resistência do material ao fluxo de ar sendo definida pela Equação 1 (JARAYAMAN, 2005).

$$R = \frac{\Delta p}{\Delta T u} \quad (1)$$

Onde:

$R$  = Resistência ao fluxo de ar ( $Rayls.m^{-1}$ );

$\Delta p$  = Variação da pressão sonora através da espessura da amostra na direção da velocidade da partícula de ar ( $N.m^{-2}$ );

$\Delta T$  = Variação da espessura (m);

$u$  = Velocidade da partícula de ar através da amostra ( $m.s^{-1}$ ).

A permeabilidade ao ar ou resistência ao fluxo também pode ser determinada a partir da norma *Standard Methods of Testing Flexible Cellular Materials – Slab Urethane Foam* (ASTM D-1564-1971). A resistência ao fluxo  $R$  da amostra é obtida a partir da Equação 2.

$$R = \frac{p}{vl} \quad (2)$$

Onde:

$R$  = Resistência ao fluxo;

$P$  = Pressão estática diferencial entre as duas faces da amostra ( $dyn.cm^{-3}$ ) ( $10^{-1}Pa$ );

$v$  = Velocidade do ar ( $cm.s^{-1}$ );

$l$  = Espessura da amostra (cm).

A resistência ao fluxo é proporcional a densidade aparente do material e ao comprimento da fibra. Fibras com uma disposição mais densa reduzem a permeabilidade ao ar (JARAYAMAN, 2005).

#### 2.4.1.4 Tortuosidade

A tortuosidade é uma forma de alongar a passagem de ar através dos poros do material. Em comparação com a espessura da amostra descreve a influência da estrutura interna de um material em suas propriedades acústicas, como uma medida de quão distante os poros se desviam do normal ou serpenteiam sobre o material. A tortuosidade afeta principalmente a localização dos picos de um quarto de comprimento de onda sonora, enquanto a porosidade e a

resistência ao fluxo afetam a altura e a largura dos picos. O valor da tortuosidade determina o comportamento de altas frequências dos materiais de absorção sonora (SEDDEQ, 2009).

#### *2.4.1.5 Densidade*

A densidade de um material é considerada um fator importante no comportamento de absorção sonora, influenciando inclusive o custo do material absorvente. De acordo com Tascan e Vaughn (2008), à medida que a densidade da amostra aumenta, se eleva o valor de absorção sonora para elevadas frequências. Isto ocorre porque a quantidade de fibras aumenta por unidade de área incrementando a densidade do material. Há uma maior perda da energia sonora à medida que o atrito com a superfície das fibras aumenta, assim há um maior coeficiente de absorção do som.

#### *2.4.1.6 Compressão*

Sob compressão entende-se a força aplicada sobre um material com o objetivo de diminuir sua espessura, resultando na aproximação das fibras internamente. A capacidade de comprimir determinado material está relacionada com os muitos dos fatores mencionados durante este trabalho, como espessura, densidade, entre outros.

Além disso, existe uma relação entre a compressão e a tortuosidade, ou seja, à medida que se comprimi um material, eleva-se sua tortuosidade, influenciando também a resistência ao fluxo de ar, conseqüentemente diminuindo a porosidade. Apesar das variações sobre os parâmetros do material comprimido, o estudo afirmou que o motivo da redução no valor de absorção sonora deve-se principalmente à diminuição da espessura da amostra (JARAYAMAN, 2005).

A influência da compressão na absorção sonora pode desempenhar um papel importante em diversos segmentos, como por exemplo no campo da acústica automotiva, pois o preenchimento do assento no veículo está sujeito a ciclos de compressão/expansão devido a massa do passageiro, podendo influenciar parâmetros físicos, como a absorção acústica (SEDDEQ, 2009).

## 2.5 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO ACÚSTICA

Para materiais porosos e fibrosos, o desempenho acústico é definido por um conjunto de constantes, associadas ao coeficiente de absorção do som ( $\alpha$ ), coeficiente de reflexão (R), impedância acústica (Z), constante de propagação, coeficiente de redução normal e perda de transmissão. Existem diferentes métodos disponíveis para determinar esses parâmetros acústicos, mas todos envolvem principalmente a exposição de materiais a campos sonoros conhecidos e a medição destes efeitos (SEDDEQ, 2009).

O desempenho dos materiais de absorção do som é avaliado em particular pelo coeficiente de absorção do som ( $\alpha$ ), sendo definido como a medida da energia acústica absorvida pelo material, geralmente expressa como uma variação decimal entre 0 e 1,0. Se 55% da energia sonora incidente for absorvida, o coeficiente de absorção desse material é 0,55. Um material que absorva todas as ondas sonoras incidentes terá um coeficiente absorção sonora de 1,0. Parâmetros que influenciam o coeficiente de absorção do som são o ângulo em que a onda sonora incide sobre o material e a frequência do som. Os valores são geralmente fornecidos na literatura no padrão de frequências pré-definidas (JARAYAMAN, 2005).

Outros parâmetros acústicos importantes que precisam ser considerados ao estudar as propriedades de absorção acústica são o coeficiente de reflexão sonora, que é a razão entre a quantidade total de intensidade sonora refletida e a intensidade total incidente de som; a impedância acústica, que é a razão entre a pressão sonora que atua na superfície da amostra; e a velocidade da partícula normal à superfície (SEDDEQ, 2009).

Comparando-se materiais absorventes de som para fins de controle de ruído, o coeficiente de redução de ruído (NRC) é comumente utilizado. Destina-se ao uso como um índice que define a eficiência de um material absorvente. Seus valores de NRC fornecem uma quantificação simples de quão bem a superfície específica absorverá o espectro da voz humana, que é a referência utilizada (SEDDEQ, 2009; PEDROSO et al., 2017).

Portanto, o NRC é definido como média aritmética entre o desempenho de absorção acústica do material em 4 frequências (250, 500, 1000 e 2000 Hz), conforme apresentado na Equação 3. Entretanto, deve ser usado com cuidado, pois não representa todo o desempenho do material (PEDROSO et al., 2017).

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (3)$$

As técnicas de medição usadas para caracterizar as propriedades de absorção sonora de materiais porosos são o método de câmara reverberante, e o método de tubo de impedância. A medição do coeficiente de absorção pelo método da câmara reverberante está descrita na *Standard Test Method for Sound and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method* (ASTM C423-17). O método de tubo de impedância possui duas técnicas, uma descrita na *Standard Test for Impedance and Absorption of Acoustical Material by Impedance Tube Method* (ASTM C384-04 (2016)) e outra na *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method; Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System* (ASTM E1050-19). Além disso, a norma ISO 10534-2/1998 apresenta metodologias para a determinação do coeficiente de absorção de som e impedância em tubos de impedância pelo método de função de transferência

### **2.5.1 Método da Câmara Reverberante**

Neste método para a medição de absorção acústica é considerado a exposição do material às ondas acústicas que incidem de forma randômica, como ocorre em um campo difuso, de modo que as ondas de som colidam com o material em todas as direções, o que requer uma grande e custosa câmara de reverberação. O coeficiente de absorção determinado por este método é denominado de coeficiente de absorção randômico (RAC).

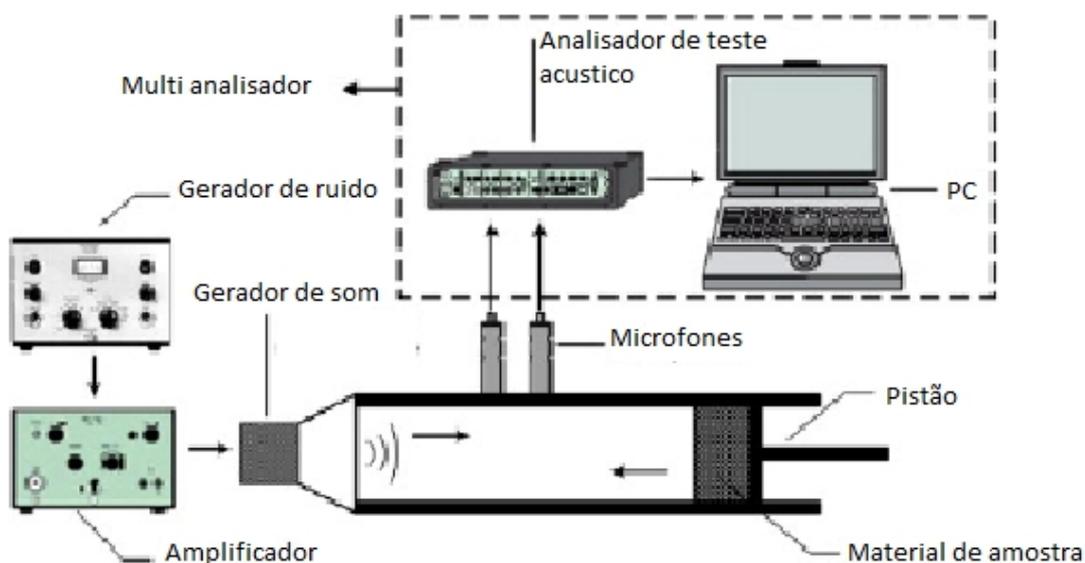
### **2.5.2 Método do Tubo de Impedância**

Utiliza ondas de som planas que colidem sobre o material de forma normal ( $90^\circ$ ), sendo, portanto, denominado coeficiente de absorção normal (NAC). Este método é fácil e rápido. Amostras circulares de 35 a 100 mm de diâmetro são utilizadas (conforme a dimensão do tubo), de modo que ondas acústicas são confinadas dentro do mesmo. As amostras devem ser grandes suficientes para preencher toda a seção do tubo (NISKANEN et al., 2017).

A diferença básica entre as duas técnicas de tubo de impedância mencionadas anteriormente, consiste que a primeira (ASTM C384-04 (2016)) é baseada na medição de uma onda estacionária usando um medidor de áudio de espectro de frequência. Assim, o coeficiente de absorção é obtido frequência a frequência. O segundo método de medição de absorção (ASTM E1050-19) é uma técnica relativamente nova, que consiste na emissão de um sinal

acústico randômico. A incidência normal de absorção acústica pode ser medida de forma mais rápida e fácil quando comparada com a técnica da câmara reverberante. Na Figura 24 apresenta-se o sistema de medição acústica por tubo de impedância conforme a norma ASTM E1050-19 (JARAYAMAN, 2005).

Figura 24 – Sistema de medição acústica por tubo de impedância.



Fonte: Adaptado de Zhu et al., (2015).

Jayaraman (2005) cita um terceiro método denominado “Método de estado estacionário”, que é empregado quando os outros dois métodos mencionados anteriormente não funcionam. Este método é descrito na *Standard Test Method for Measurement of Airbone Sound Attenuation Between Rooms in Buildins* (ASTM E336-20). Neste método é introduzido um terceiro microfone ou um segundo par de microfones que são inseridos entre a amostra e um segundo tubo de impedância (ASTM C384-04 (2016)).

### 2.5.3 Relação entre os coeficientes obtidos pelo método do tubo de impedância e câmara reverberante

Os coeficientes de absorção sonora de incidência normal podem ser bastante úteis em situações em que o material a ser testado é colocado dentro de uma pequena cavidade acústica hermeticamente fechada próximo de uma fonte de som. Este método de ensaio permite analisar valores relativos de absorção sonora quando é impraticável a produção de grandes amostras,

que são necessárias para medições precisas de incidência aleatória em uma câmara de reverberação. Entretanto, nem sempre é possível obter uma comparação consistente entre as técnicas.

A relação poderá variar dependendo das propriedades físicas, como espessura e condições de montagem do próprio equipamento. No entanto, pode-se afirmar com uma aproximação que a partir do método de incidência aleatória (na câmara reverberante) os valores obtidos são duas vezes os valores de incidências normais nas faixas baixas (0,25 a 0,35 Hz). Em faixas intermediárias e mais elevadas são aproximadamente iguais (NISKANEN et al., 2017; JARAYAMAN, 2005).

Diante dos diversos trabalhos pesquisados, não foi encontrado nenhum estudo similar a este proposto que avalie especificamente a influência das camadas do não tecido, mantendo a espessura e gramatura na absorção acústica constante, utilizando fibras de poliéster variando apenas o número de camadas de véus.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item descrevem-se os materiais e as metodologias empregadas para avaliar o não tecido de poliéster, e a influência na absorção acústica causada pela variação da quantidade das camadas de véus durante sua formação.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Fibras

Foi utilizado uma mistura de diferentes fibras de poliéster (PET), garantindo que todas as amostras apresentassem o mesmo percentual de fibras. No Quadro 3 apresenta-se o tipo de fibra de poliéster utilizada, seu percentual para a produção das amostras, bem como a descrição das mesmas.

Quadro 3 – Fibras utilizadas.

Fibra de PET	Mistura (%)	Descrição comercial das fibras
Bicomponente, virgem	30	4 <i>denier</i> , 51 mm, branca
Oca conjugada reciclada	28	7 dtex, 64 mm, branca
Oca regular, reciclada	14	15 <i>denier</i> , 64 mm, semi-opaca
Virgem regular	28	10 <i>denier</i> , 64 mm, branca

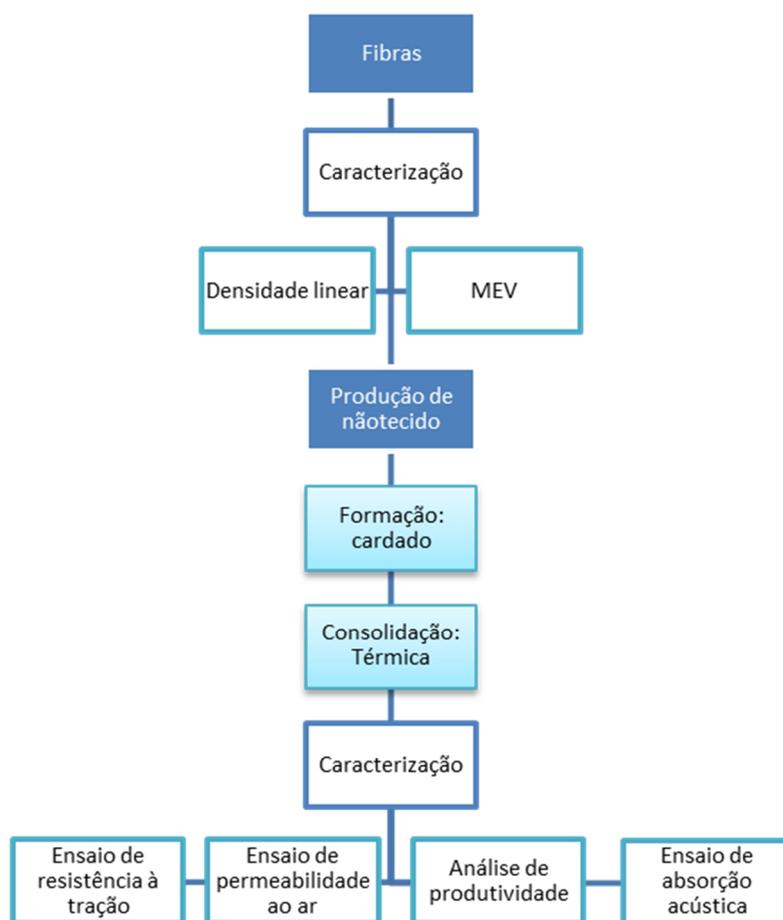
Fonte: Autor (2021).

#### 3.2 MÉTODOS

Os procedimentos experimentais conduzidos nesse trabalho foram desenvolvidos junto a diferentes laboratórios de distintas instituições, tais como, o Laboratório de Vibrações e Acústica (LAV) e Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), ambos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); o Laboratório do Instituto de Inovação Biossintéticos e Fibras do Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil (CETIQT); o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI); o Laboratório de Tecnologia e Qualidade em Sistemas de Engenharia (TESIS); do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), bem como o Laboratório de Controle de Qualidade da empresa ALBANY.

De forma geral, esse trabalho foi conduzido baseado em diferentes etapas vinculadas primeiramente com a caracterização das fibras; posteriormente, a produção e caracterização de diferentes amostras de não tecido; e por fim, a avaliação das amostras de não tecido, por meio de diferentes ensaios relacionadas a resistência à tração, permeabilidade ao ar, absorção acústica e análise de produtividade. Na Figura 25 apresenta-se de forma esquemática as atividades experimentais desenvolvidas ao longo da pesquisa.

Figura 25 – Representação esquemática das atividades experimentais.



Fonte: Autor (2021).

### 3.2.1 Caracterização das fibras

Com o objetivo de analisar as fibras de poliéster utilizadas na produção do não tecido foi empregado a técnica de determinação da densidade linear (título). Além disso, para identificar as características morfológicas das mesmas, foi realizado uma análise de microscopia eletrônica de varredura.

### 3.2.1.1 Determinação da densidade linear das fibras

Os ensaios de determinação da densidade linear foram realizados no Laboratório do Instituto de Inovação Biossintéticos e Fibras do CETIQT. Esse ensaio foi realizado seguindo recomendações da norma ASTM D1577-07(2018) com o aparelho Vibroskop 400 da marca Lenzing Instruments (Figura 26).

Figura 26 – Aparelho medição densidade linear.



Fonte: Autor (2021).

Foram separadas individualmente dez fibras de cada um dos quatro tipos de fibras poliéster que compõe a mistura utilizada para a produção das amostras de não-tecido (Quadro 3) e todas foram cortadas no comprimento de 50 mm. Posteriormente, as fibras foram pesadas em balança de precisão para determinar a massa média. Nesse sentido, para a determinação do título médio em *denier* das fibras foi utilizado a Equação 4.

$$x = \frac{m \times 9000}{L} \quad (4)$$

Onde:

$x$  = Título médio das fibras (*denier*);

$m$  = Massa média das fibras (g);

$L$  = Comprimento total das fibras (m).

Após determinado o título médio das fibras, foi utilizada a tabela do fabricante do equipamento para determinar a massa do acessório que manteve tensionada a fibra quando a mesma foi fixada na pinça do aparelho, para a determinação do título individual (Anexo A). Diante disso, após realizar os cálculos foi selecionada a pinça de 500 mg.

Para a determinação do título das fibras, individualmente as mesmas foram tensionadas de acordo com a massa tensora, presente na tabela do equipamento, fornecida pelo fabricante. A partir disso, foi visualizado no display do equipamento o título de cada fibra utilizada.

### 3.2.1.2 *Análise de microscopia eletrônica de varredura das fibras*

A análise morfológica das superfícies das fibras foi realizada no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), da UFSC, campus Florianópolis através da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura JEOL, modelo JSM-6390LV. Essa análise foi empregada para as quatro fibras utilizadas para a formação do nãotecido (Quadro 3). As amostras foram, inicialmente, depositadas em um *stub* e recobertas com ouro, por meio da técnica de “*sputtering*” em uma recobridora modelo EM SCD 500, da marca LEICA. As amostras foram ampliadas em 500 vezes.

### 3.2.2 **Produção dos nãotecidos**

A produção das amostras de nãotecido foi realizada utilizando uma mistura de fibras, e seus respectivos percentuais, conforme apresentado no Quadro 3. Foram utilizados aproximadamente 600 Kg de mistura das fibras de poliéster, devido ao acerto e estabilização do processo. Na Figura 27 apresenta-se os fardos de fibras sendo preparados nos carregadores para a produção das amostras.

Para a produção das amostras foi utilizado o processo de cardagem a seco utilizando uma carda da marca SPINNBAU BREMEN, modelo 2104, ano de fabricação 2006, de alta capacidade de produção, corpo duplo, com capacidade de cardagem de até 1000 Kg.h<sup>-1</sup> de fibra

de poliéster, e dois cilindros destacadores de fibras na saída (Figura 28), seguido de um dobrador de véus horizontal da marca HEISKY, com velocidade entrada de  $90 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  e capacidade de dobra de até 4 m de largura.

Figura 27 – Fardos de fibras nos carregadores.



Fonte: Autor (2021).

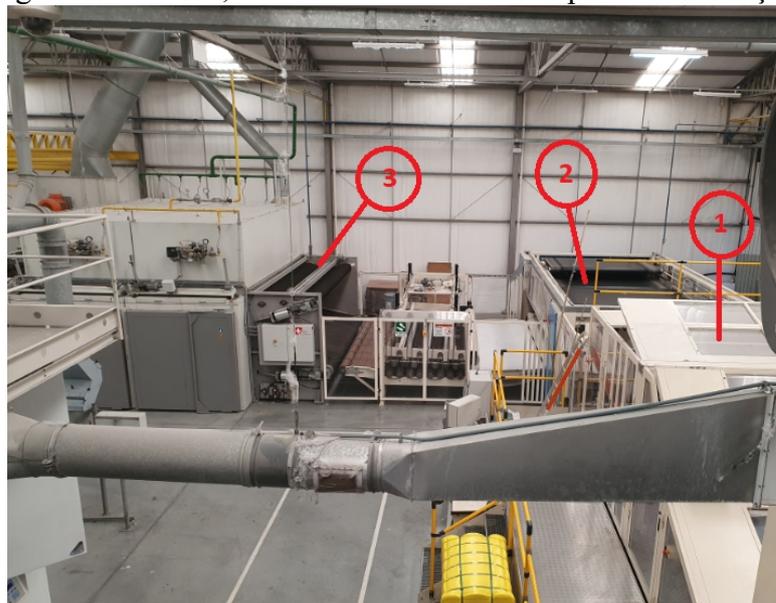
Figura 28 – Carda para produção das amostras.



Fonte: Autor (2021).

Durante a produção das amostras, a umidade do ar foi de aproximadamente 40 % e temperatura de aproximada de 30 °C. O forno de consolidação utilizado é da marca STRAHM, sendo o aquecimento de ar indireto por queimadores a gás natural, com 4 m de zona quente e 2 m de zona fria, podendo atingir na zona quente uma temperatura de aquecimento de ar de até 190 °C. A Figura 29 apresenta o conjunto formado pela carda, dobrador de véus e forno para a consolidação térmica utilizado para a produção das amostras de nãotecidos.

Figura 29 – Carda, dobrador de véus e forno para consolidação.



Nota: Carda (1); Dobrador de véus (2); Forno para a consolidação térmica (3).  
Fonte: Autor (2021).

Com o objetivo de avaliar a influência do número de camadas de véus na capacidade de absorção acústica, foram produzidas diferentes amostras com distintas camadas. Nesse sentido, as amostras de nãotecido do grupo A contou com 6 amostras independentes de 24 camadas. Para o grupo B foi produzido 6 amostras de nãotecidos com 40 camadas, e por fim, as amostras do grupo C, possuíam 6 amostras de nãotecido com 58 camadas.

O número de camadas foi escolhido considerando os limites do equipamento de produção. Para o número de 24 camadas, buscou-se utilizar a capacidade máxima de gramatura e espessura do véu que a carda conseguiria produzir para a amostra. Enquanto isso, o número de 58 camadas foi definido pela gramatura mínima de véu que a carda produzia, o que também é compatível com a velocidade mínima que a linha (saída do dobrador) conseguiu operar, que é de  $1 \text{ m min}^{-1}$ . A quantidade de 40 camadas foi obtida buscando encontrar um valor intermediário entre o máximo e mínimo de camadas previamente estabelecidos.

### 3.2.2.1 Determinação da resistência à tração das amostras de não tecidos

Para o ensaio de resistência à tração foi utilizado uma máquina universal de ensaios (EMIC DL 2000/700). O ensaio foi realizado seguindo recomendações da norma NBR 16832/2020 (ABNT, 2020) e foram conduzidos no Laboratório de Tecnologia e Qualidade de Sistemas em Engenharia (TESIS).

A realização dos ensaios ocorreu em triplicata para cada grupo de amostras (A, B e C). As amostras foram ensaiadas em duas direções distintas, uma denominada *Machine Direction* (MD) que é a mesma direção da orientação das fibras que formam o véu na saída da carda; a outra direção é denominada *Cross Direction* (CD) que é a direção perpendicular à da saída das fibras/véu da carda, representando a direção de saída do dobrador (RUSSELL, 2007). No Quadro 4 apresenta-se a orientação em que as amostras de não tecido foram submetidas para o ensaio de tração.

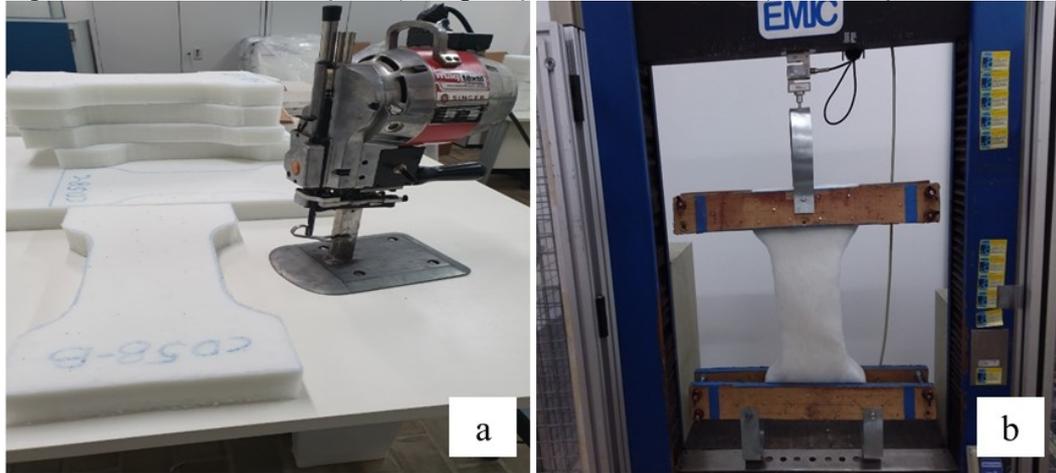
Quadro 4 – Orientação das amostras para o ensaio de tração.

<b>Amostra</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Nº camadas</b>	<b>Orientação</b>	<b>Corpo de provas</b>
A	1	24	MD	MD24 – A
A	1	24	MD	MD24 – B
A	1	24	MD	MD24 – C
A	1	24	CD	CD24 – A
A	1	24	CD	CD24 – B
A	1	24	CD	CD24 – C
B	1	40	MD	MD40 – A
B	1	40	MD	MD40 – B
B	1	40	MD	MD40 – C
B	1	40	CD	CD40 – A
B	1	40	CD	CD40 – B
B	1	40	CD	CD40 – C
C	1	58	MD	MD58 – A
C	1	58	MD	MD58 – B
C	1	58	MD	MD58 – C
C	1	58	CD	CD58 – A
C	1	58	CD	CD58 – B
C	1	58	CD	CD58 – C

Fonte: Autor (2021).

Os corpos de provas foram fixados no equipamento utilizando uma célula de carga de 5000 N e velocidade de tração de  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , até a ruptura do corpo de provas. Na Figura 30 apresenta-se detalhes do corpo de prova das amostras de nãotecido.

Figura 30 – Ensaio de tração. a) Preparação das amostras. b) Realização do ensaio.



Fonte: O autor (2021).

### 3.2.2.2 Ensaio de permeabilidade ao ar das amostras de nãotecidos

O ensaio de permeabilidade ao ar, também conhecido como resistência ao fluxo de ar, foi realizado em triplicata nas amostras de nãotecido. Para este ensaio foi utilizado o equipamento TEXTEST Instruments/FX3360 (Figura 31).

Figura 31 – Equipamento para teste de permeabilidade ao ar.



Fonte: Autor (2021).

A vazão de ar foi mensurada pelo volume em pés cúbicos que passaram por uma área definida de um pé quadrado durante o tempo de um minuto, representada por CFM (*Cubic Feet Minute*). No ensaio foi utilizado um orifício de medição de diâmetro de 4,5 cm, conforme

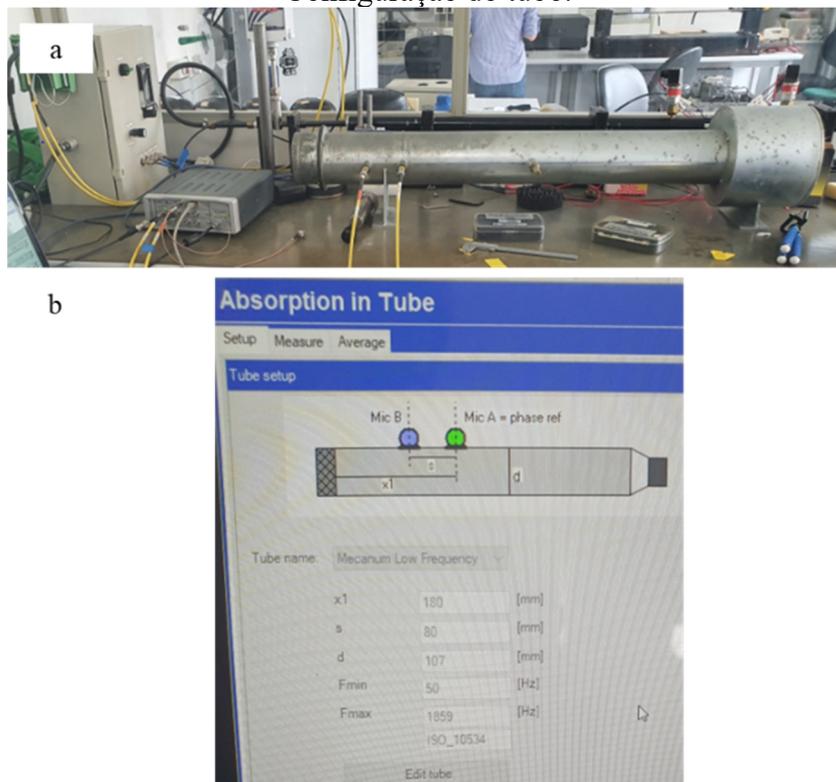
recomendações do fabricante do equipamento. O resultado do ensaio foi obtido pela leitura direta no visor do equipamento.

### 3.2.2.3 Ensaio de absorção acústica das amostras de não tecidos

Os ensaios de absorção acústica foram realizados no Laboratório de Vibrações e Acústica (LAV) da UFSC. Para o ensaio foi utilizado o método do tubo de impedância, indicado pela norma ISO 10534-2/1998. Nesse sentido, com a utilização da Equação 3 foi viável calcular o NRC para cada grupo de amostra, sendo possível realizar a comparação do comportamento acústico.

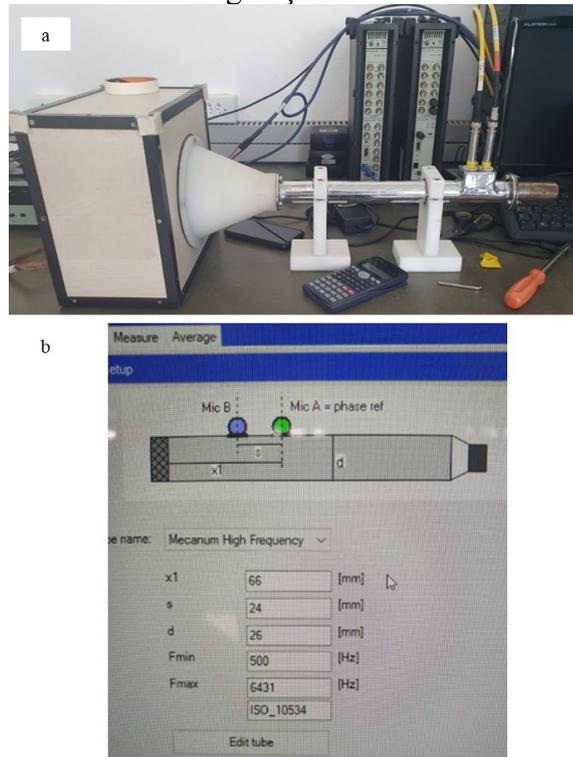
Nesse ensaio foram utilizados dois tubos de impedância: um dos tubos com diâmetro de 107 mm, capaz de medir na faixa de frequências de 50 a 1859 Hz; e outro com diâmetro de 26 mm, com capacidade de medir as faixas de frequência de 500 a 6431 Hz. Na Figura 32 e na Figura 33 apresentam-se os tubos de impedância, juntamente com suas características de configuração.

Figura 32 – Tubo de impedância com diâmetro 107 mm. a) Vista frontal do equipamento. b) Configuração do tubo.



Fonte: Autor (2021).

Figura 33 – Tubo de impedância diâmetro 26 mm. a) Vista frontal do equipamento. b) Configuração do tubo.



Fonte: Autor (2021).

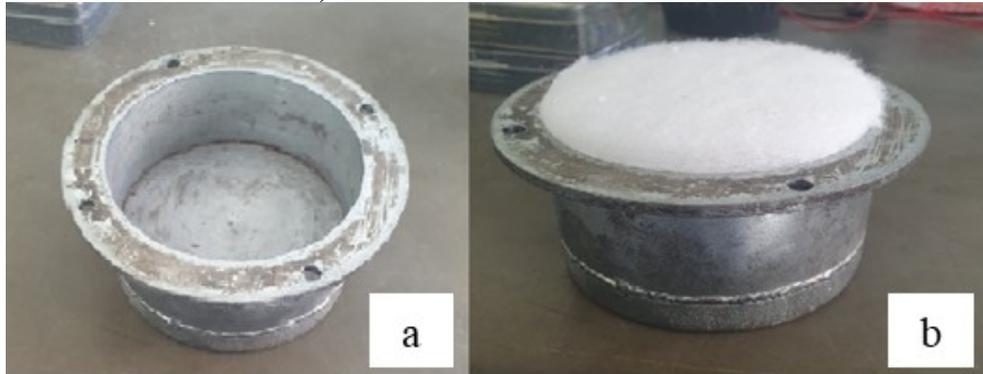
Para realização dos ensaios no tubo de impedância para cada grupo (A, B e C), foram extraídos oito corpos de provas (Figura 34), sendo três para o tubo de maior diâmetro e cinco para o de menor, totalizando vinte e quatro corpos de provas. Para a realização do ensaio, os corpos de provas eram colocados cuidadosamente no dispositivo de fixação do tubo de impedância (Figura 35) preenchendo todo o volume. A seguir, este era parafusado ao tubo na extremidade oposta à fonte geradora de som.

Figura 34 – Corpos de provas de uma amostra de nãotecido.



Fonte: Autor (2021).

Figura 35 – Dispositivo de fixação dos corpos de provas. a) Sem amostras de não-tecido.  
b) Com amostras de não-tecido.



Fonte: Autor (2021).

#### 3.2.2.4 Avaliação de produtividade das amostras de não-tecidos

A capacidade de produção das amostras com diferentes camadas (24, 40, 58 camadas) foi avaliada considerando a produtividade do conjunto formado pela carda e dobrador em sua capacidade de produção ( $\text{Kg.h}^{-1}$ ) de não-tecido.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados estão apresentados baseado nas diferentes etapas em que o trabalho foi conduzido. Primeiramente, foi apresentado a caracterização das fibras utilizadas (densidade linear e microscopia eletrônica de varredura) para a fabricação das diferentes amostras de não tecido. Posteriormente, a produção do não tecido foi abordada, e por fim, a avaliação do não tecido produzido (resistência a tração, permeabilidade ao ar, absorção acústica e análise de produtividade) foi apresentada.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE POLIÉSTER

#### 4.1.1 Densidade linear

Na Tabela 1 apresenta-se os valores de título direto em *denier* das quatro fibras de poliéster utilizadas para a formação dos não tecidos.

Tabela 1 – Título médio das fibras em *denier*.

<b>Medição</b>	<b>Fibra A</b>	<b>Fibra B</b>	<b>Fibra C</b>	<b>Fibra D</b>
1º	5,42	11,94	21,52	11,06
2º	4,90	13,97	18,03	8,58
3º	4,61	12,20	21,11	9,34
4º	4,45	11,63	19,60	8,11
5º	5,11	12,69	19,75	10,18
6º	4,55	12,57	20,61	10,19
7º	5,19	14,04	17,13	9,27
8º	4,30	14,91	18,08	11,27
9º	4,72	12,53	18,79	11,52
10º	4,82	12,93	20,13	10,64
Média	4,61	13,46	19,0	11,14
Desvio padrão	0,28	1,27	1,04	0,45

Fonte: O autor (2021).

Como o título das fibras é um fator importante na absorção acústica do não tecido e a densidade do não tecido é influenciada pela quantidade de fibras por unidade de volume, pode-se determinar o título médio das fibras que compõe o não tecido por meio de uma ponderação do título e o percentual de fibra utilizado na blenda, por meio da Equação 5.

$$n = \sum_{x=1}^x (d_x \times \%_x) \quad (5)$$

Onde:

$n$  = Título médio ponderado das fibras (*denier*);

$d$  = Título da fibra (*denier*);

$x$  = Quantidade de fibras;

$\%$  = Percentual da fibra na composição da blenda.

Considerando os percentuais das fibras apresentado no Quadro 3, e o título obtido pela análise de densidade linear apresentados na Tabela 1, tem-se o seguinte resultado.

$$n = ((4,61 \times 0,30) + (11,14 \times 0,28) + (13,46 \times 0,28) + (19 \times 0,14))$$

$$n = 10,93 \text{ denier}$$

O título médio das fibras utilizadas para a produção do não-tecidos é de aproximadamente 11 *denier*. Segundo Albrecht et al. (2005) existe uma relação empírica entre o título das fibras processadas na carda e a gramatura da manta obtida no final do processo de formação ( $\text{g m}^{-2}$ ) mínima e máxima. Esta relação é representada pelas Equações 6 e 7.

$$m_{F \min} = 5 \times \sqrt[2]{T_F} \quad (6)$$

$$m_{F \max} = 3 \times m_{F \min} \quad (7)$$

Onde:

$m_{F \min}$  = gramatura mínima do véu ( $\text{g.m}^{-2}$ );

$T_F$  = título das fibras processadas;

$m_{F \max}$  = gramatura máxima do véu ( $\text{g.m}^{-2}$ ).

Então:

$$m_{F \min} = 5 \times \sqrt[2]{10,93} = 16,5 \text{ g.m}^{-2}$$

$$m_{F \max} = 3 \times 16,5 = 49,5 \text{ g.m}^{-2}$$

Esta relação apresentada pelas Equações 6 e 7, conforme demonstrado por Albrecht et al. (2005), é utilizada para uma carda composta por um único cilindro destacador. A carda utilizada neste trabalho é de elevada produção, composta por dois cilindros destacadores de fibras, ou seja, cada camada que forma o não-tecido é composta por dois véus (Figura 36), o que possibilita formar véus duplos com camadas do dobro da gramatura máxima calculada para um véu, neste caso camadas de até aproximadamente  $100 \text{ g.m}^{-2}$ .

Figura 36 – Saída da carda de dois véus formando uma camada.



Fonte: Autor (2021).

As amostras produzidas foram com 24, 40 e 58 camadas, a carda utilizada produz cada camada com dois véus, desta forma a gramatura de cada véu está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidade de véus por camada de amostra.

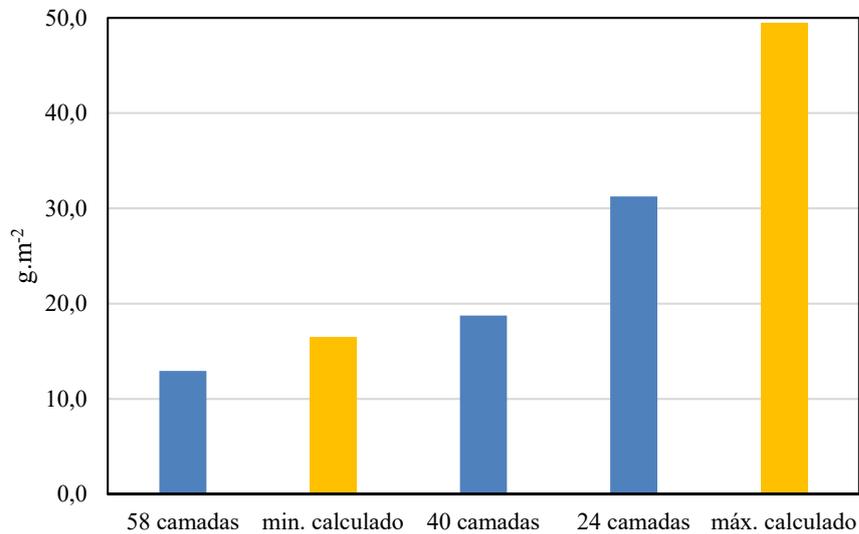
<b>Amostra</b>	<b>Número de camadas</b>	<b>Gramatura por véu (<math>\text{g.m}^{-2}</math>)</b>	<b>Gramatura da camada (<math>\text{g.m}^{-2}</math>)</b>
A	24	31,2	62,5
B	40	18,7	37,5
C	58	12,9	25,8

Fonte: Autor (2021).

Considerando os cálculos de gramatura dos véus utilizando o título direto ponderado das fibras (Equação 5) e a relação com o cálculo das gramaturas mínima e máxima, respectivamente (Equações 6 e 7) foi possível identificar que a amostra de 58 camadas foi produzida com um véu de gramatura aproximadamente 21% menor que o mínimo teórico

calculado. Ao mesmo tempo, os outros grupos com 40 e 24 camadas, ficaram dentro dos limites calculados de mínimo e máximo (Figura 37).

Figura 37 – Comparação entre a gramatura das camadas de véus teórica e prática.



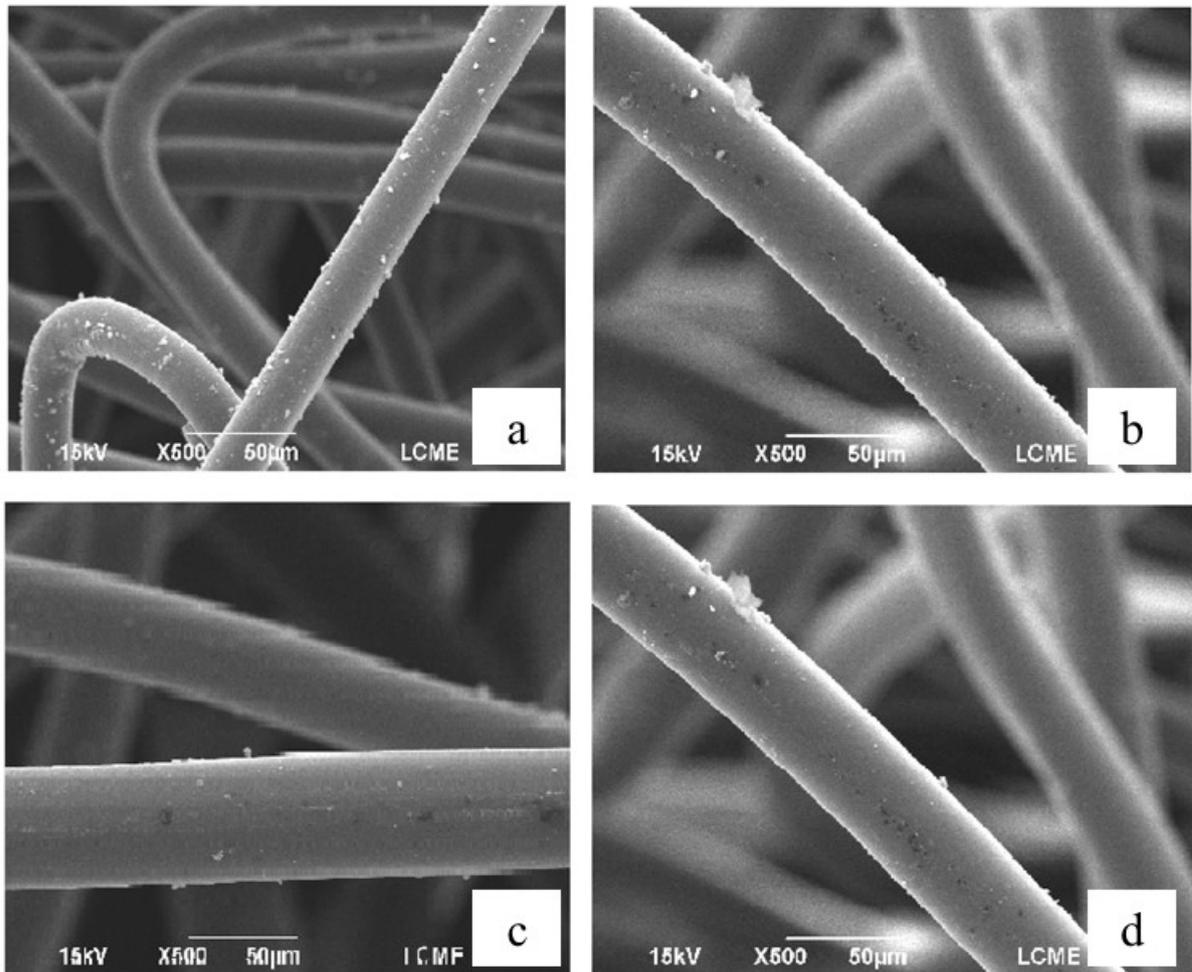
Fonte: Autor (2021).

O fato do grupo C (composto por 58 camadas) ter sido produzida com um véu de menor gramatura que o mínimo, demonstra que o equipamento utilizado apresenta uma maior abrangência de gramaturas que os comumente utilizados. Esse fato corrobora com Albrecht et al. (2005), onde os autores apresentam que estes cálculos de capacidade de produção são baseados em experiências empíricas, pois cada equipamento apresenta suas próprias características.

#### 4.1.2 Características morfológicas

Com o objetivo de identificar a morfologia longitudinal das fibras empregadas na produção do não tecido, o resultado da análise MEV para as quatro fibras utilizadas é observada na Figura 38. As imagens a,b, c e d da Figura 38 referem-se, as fibras de 4,6; 13,5; 19 e 11,1 *denier*, respectivamente. Para todas as fibras foi observada uma superfície lisa e praticamente sem rugosidades.

Figura 38 – MEV das fibras utilizadas para a produção do nãotecido.



Fonte: Autor (2021).

## 4.2 FORMAÇÃO DO NÃOTECIDO

Foram produzidos três conjuntos de amostras com a mesma mistura de fibras de poliéster (A, B e C), com mesma espessura do nãotecido (50 mm) e gramatura (1500 g.m<sup>-2</sup>), pelo processo de cardagem a seco e consolidação térmica, variando somente a quantidade de camadas de cada grupo (24, 40 e 58 camadas), e conseqüentemente a velocidade de produção. Na Tabela 3, apresenta-se a produção da carda por hora, bem como a velocidade de produção de cada amostra de nãotecido.

Tabela 3 – Desenho experimental das amostras produzidas.

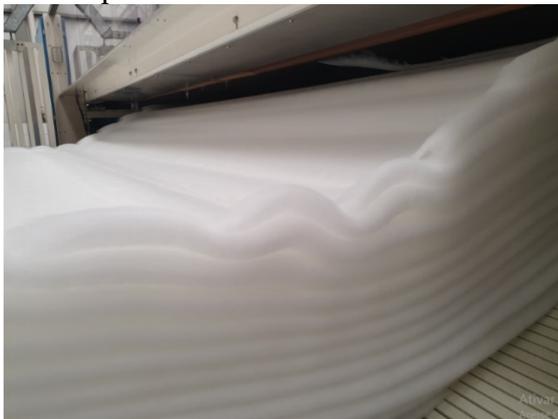
Amostra	Número de camadas	Produção da carda (Kg.h <sup>-1</sup> )	Velocidade produção (m.min <sup>-1</sup> )
A	24	832	2,3
B	40	566	1,7
C	58	399	1,1

Fonte: Autor (2021).

Para não tecidos com menor número de camadas a carda produz um véu de maior gramatura, desta forma sua produção em Kg.h<sup>-1</sup> é maior. À medida que é aumentada a quantidade de camadas na amostra de não tecido, o véu produzido pela carda diminui sua gramatura, reduzindo também sua produção em Kg.h<sup>-1</sup>.

Na Figura 39 apresenta-se as camadas de não tecido formadas na saída do dobrador de véus horizontal. Após a formação do não tecido, ocorreu a etapa de consolidação das amostras, através do processo de consolidação térmica. Para cada grupo de amostra (A, B e C) foram produzidos 5 painéis (placas) de tamanho de 60 x 120 cm (Figura 40).

Figura 39 – Véus sobrepostos em camadas na saída do dobrador horizontal.



Fonte: Autor (2020).

Figura 40 – Painéis de amostras de não tecido.

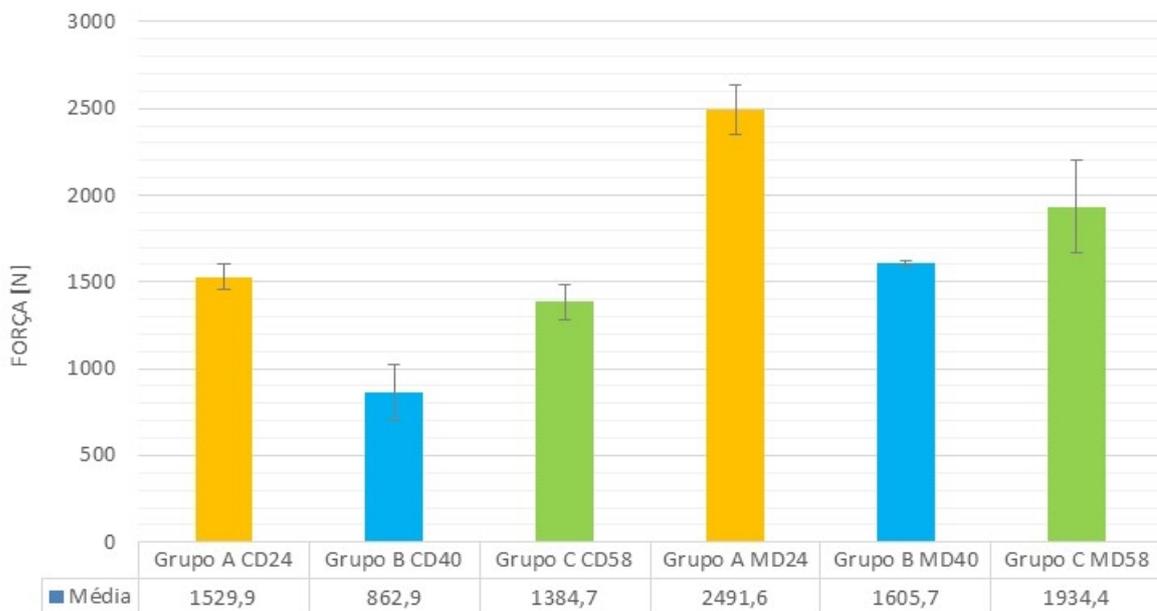


Fonte: Autor (2021).

#### 4.2.1 Resistência à tração das amostras de não tecidos

De forma geral, todas as amostras apresentaram uma maior resistência à tração na direção de saída da carda (MD) quando comparada com o mesmo número de camadas no sentido cruzado ao de saída da carda (CD) (Figura 41). Este resultado já era esperado para não tecidos formados utilizando carda e dobrador de véus, uma vez que a orientação das fibras (decorrente do processo de formação do véu) influencia as propriedades mecânicas durante os ensaios (FARUKH et.al., 2014). Não tecidos formados pela técnica de carda apresentam propriedades anisotrópicas, variando de acordo com a direção que o não tecido é testado (KIM; POURDEYHIMI 2001). A anisotropia mecânica é característica predominante do não tecido. Este fenômeno está relacionado com orientação aleatória das fibras herdado do processo de formação do véu (FARUKH et.al., 2014).

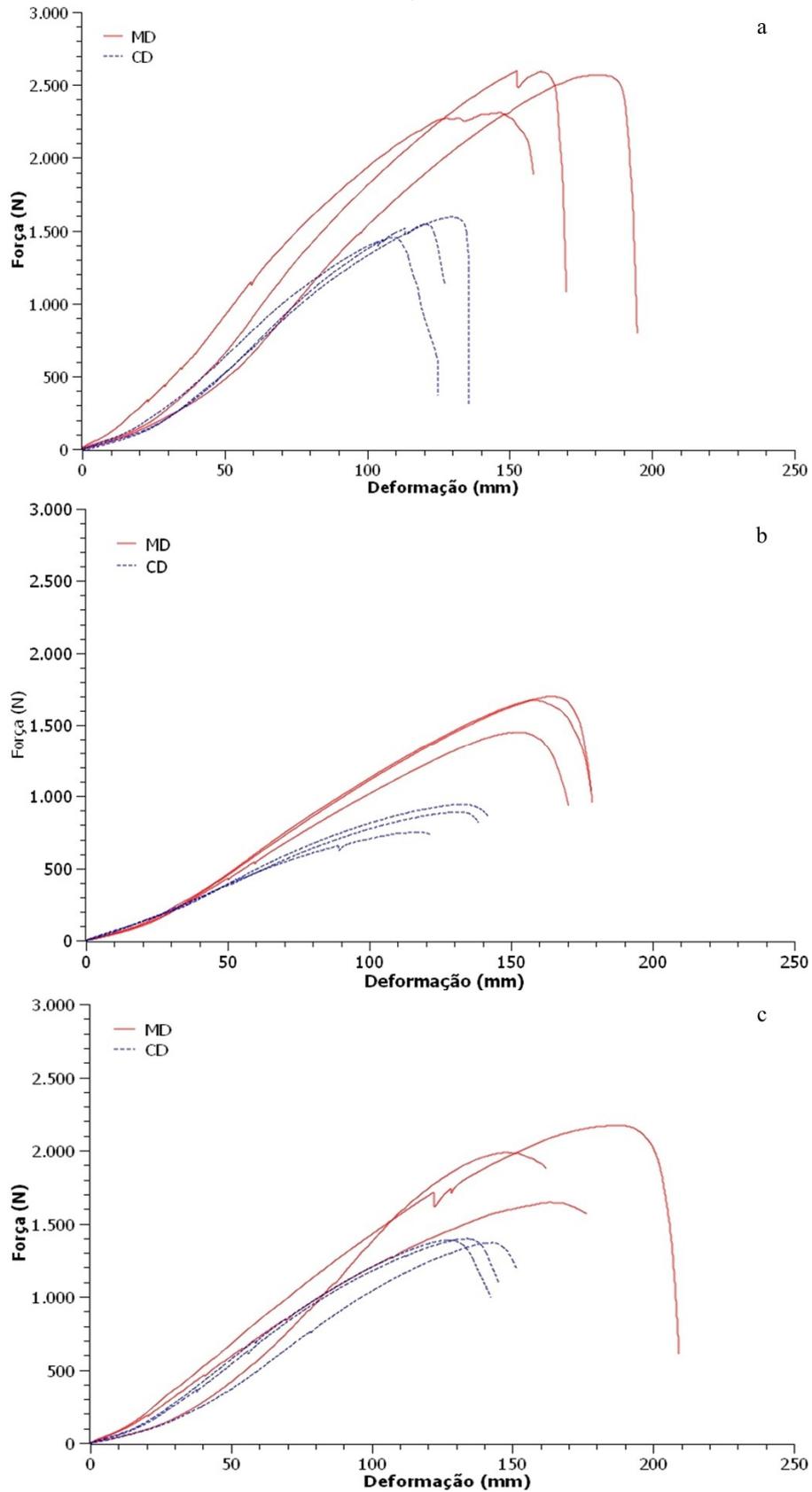
Figura 41 – Resistência à tração das diferentes amostras de não tecido.



Fonte: Autor (2021).

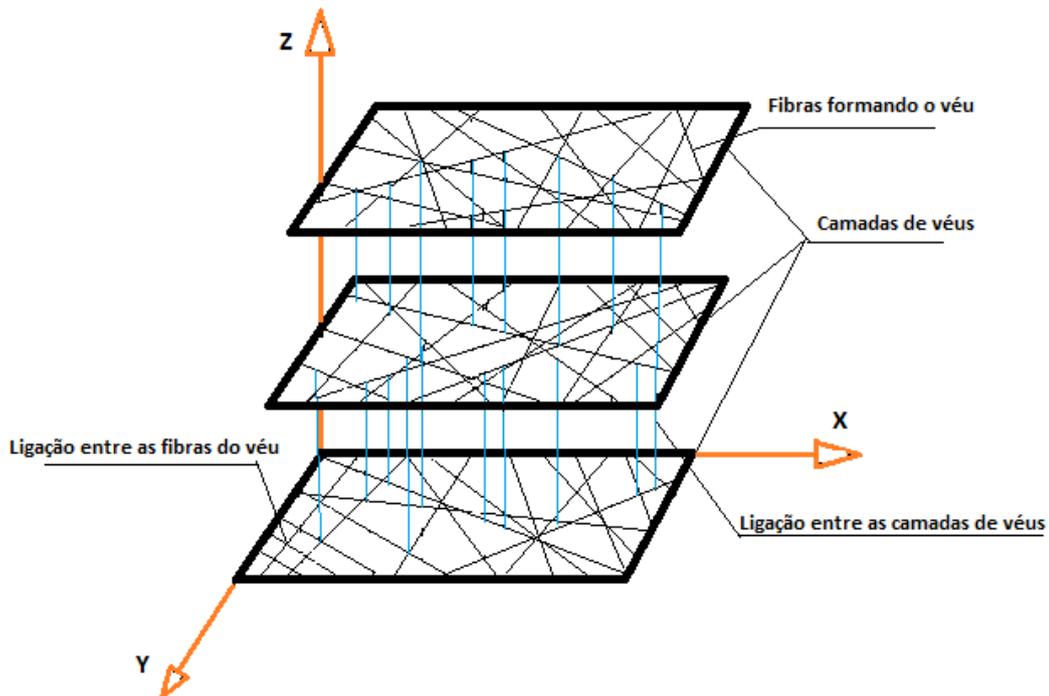
Na Figura 42 ilustra-se os resultados individuais para cada grupo de fibras, onde é possível observar o comportamento de cada grupo em função da quantidade de camadas.

Figura 42 – Resistência à tração para cada grupo de não tecido (MD e CD). a) 24 camadas. b) 40 camadas. c) 58 camadas.



O grupo formado pelas amostras com 24 camadas de véus apresentou a melhor resistência à tração, quando comparadas com os outros grupos de 40 e 58 camadas. Esses resultados mostraram que a interação das fibras no interior dos véus e a quantidade de pontos de ligação da fibra bicomponente do véu é maior que a interação das fibras entre as camadas que são sobrepostas, onde é observado maior densidade de fibras nos véus e menor entre as camadas. Segundo o estudo de Liao Adanur e Drean (1997), o qual propõem uma teoria denominada como “células unitárias” (véus) e “teoria das camadas”, os não tecidos são compostos por um número discreto e finito de células (fibras). Estas células, que formam os véus, possuem diferentes estruturas e propriedades, e formam as camadas que são conectadas por fibras perpendiculares ao seu plano. A representação simplificada destas estruturas está na apresentada na Figura 43.

Figura 43 – Exemplo simplificado da estrutura de um não tecido com multicamadas.



Fonte: Adaptado de Liao Adanur e Drean (1997).

Esta interação mais fraca entre as camadas de véus quando comparada com a existente no interior do véu é mais facilmente observada no ensaio de tração da amostra com 58 camadas (Figura 44), onde a ligação entre as camadas já está comprometida durante o ensaio de tração e os véus ainda possuem maior integridade.

Figura 44 – Ligação das camadas de véus comprometida no ensaio de tração.

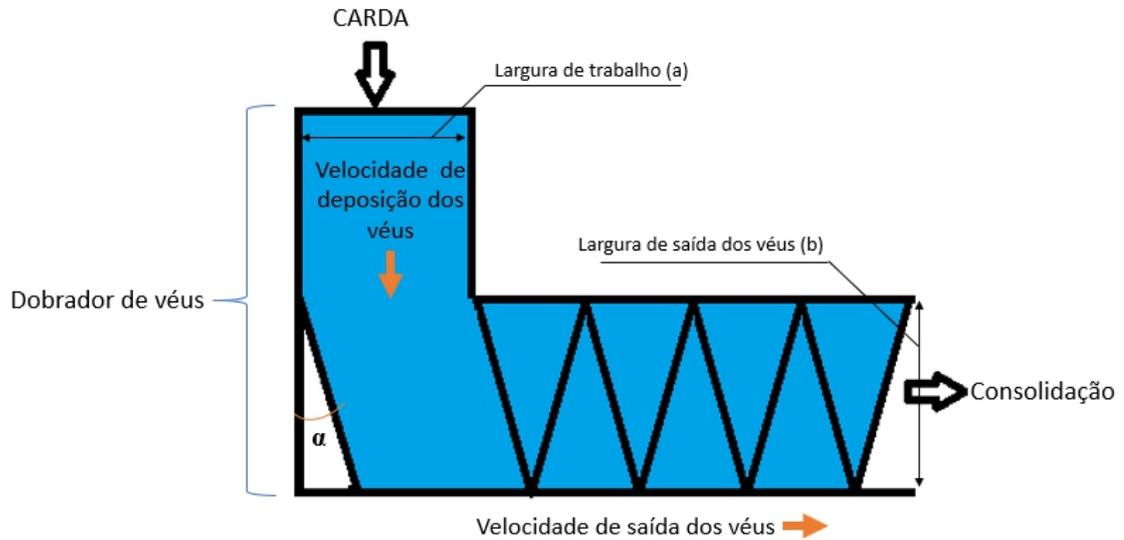


Fonte: Autor (2021).

A teoria apresentada por Liao Adanur e Drean (1997) corrobora para explicar o comportamento que ocorreu entre as amostras formadas nos grupos com 24, 40 e 58 camadas. A interação entre as camadas é mais fraca do que a existente no interior dos véus. Desta forma, quanto maior o número de camadas menor é a resistência a tração. No entanto, ao confrontar-se a teoria apresentada com o que ocorreu entre o material com 40 e 58 camadas, verifica-se que existem outros elementos na construção dos véus, e na sobreposição das camadas. Esses elementos devem influenciar na resistência do material, indicando a existência de um “ponto ótimo” entre a quantidade de camadas e a densidade dos véus. Esse fato ocorreu porque o grupo formado por 40 camadas deveria apresentar uma resistência a tração intermediária entre as amostras de 24 e 58 camadas, entretanto, este grupo apresentou os valores mais inferiores.

Outro fator importante que pode ter influenciado na relação da resistência à tração (MD:CD) em nãotecidos formados, utilizando um dobrador de véus horizontal, é o ângulo de deposição das fibras formado entre a velocidade de deposição dos véus (MD) e a velocidade de saída dos véus do dobrador (CD) denominado ângulo “ $\alpha$ ”. Quanto maior o ângulo “ $\alpha$ ” menor será a relação MD:CD (REWALD, 2016). Na Figura 45 está ilustrado a formação do ângulo “ $\alpha$ ” no dobrador de véus.

Figura 45 – Formação do ângulo “ $\alpha$ ” no dobrador de véus.



Fonte: Autor (2021).

Segundo Rewald (2016), o ângulo “ $\alpha$ ” pode ser medido através da Equação 8. Desta forma, é possível calcular o ângulo de cada grupo de amostras, uma vez que a largura de entrada dos véus é de 2,5 m e a largura de saída é de 4 m para todas as amostras produzidas foi utilizada a mesma.

$$CV = \frac{a}{\tan \alpha \cdot b} \quad (8)$$

Onde:

CV: Quantidade de camadas de véus;

$\alpha$ : Largura de trabalho;

b: Largura de saída dos véus.

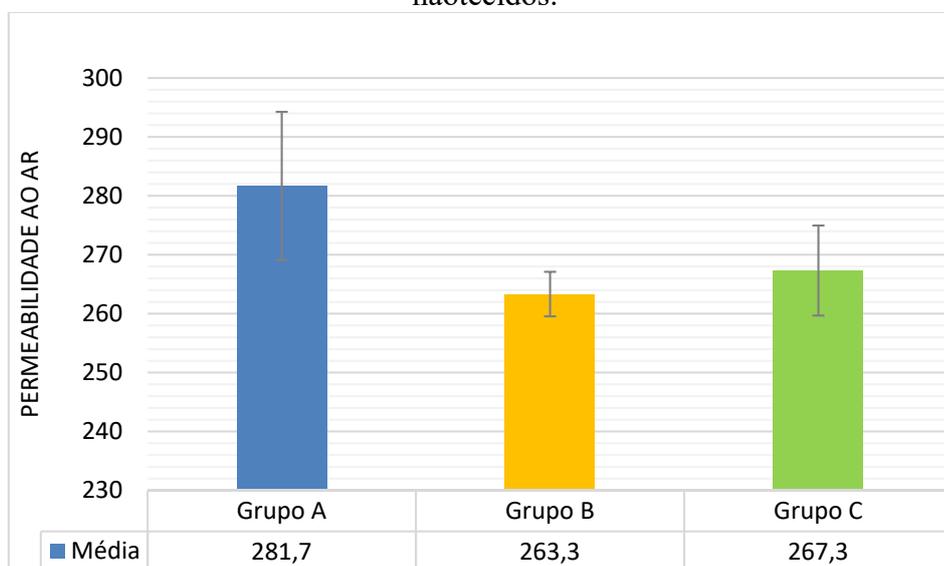
Realizado o cálculo utilizando a Equação 8, são encontrados os seguintes ângulos para as amostras com 24, 40 e 58 camadas respectivamente, 1,49°, 0,89° e 0,61°. Estes valores são coerentes quando observado as velocidades de produção de não tecidos, destacadas na Tabela 3, onde o material com menor número de camadas tem a maior velocidade. À medida que aumenta-se a quantidade de camadas, a velocidade de produção reduz-se, bem como o ângulo  $\alpha$ .

Assim, a teoria das células unitárias juntamente com a determinação do ângulo  $\alpha$  podem influenciar nos resultados apresentados de resistência à tração em nãotecidos.

#### 4.2.2 Permeabilidade ao ar das amostras de nãotecidos

Na Figura 46 apresenta-se os resultados de permeabilidade ao ar para as diferentes amostras de nãotecidos avaliadas. O grupo A formado por três amostras de 24 camadas, apresentou a maior permeabilidade ao ar que os outros grupos. Este resultado já era esperado uma vez que existe um menor número de camadas sobrepostas. Isto significa que uma maior quantidade de ar atravessou o nãotecido. Entretanto, quando observado o desvio padrão dos três grupos, foi possível verificar que os valores se sobrepõem, ficando mais evidente entre os grupos B e C (Figura 46). A diferença entre o maior valor médio e o menor é de  $18,4 \text{ ft}^3 \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ , uma diferença de 6,5% na permeabilidade.

Figura 46 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar para as diferentes amostras de nãotecidos.



Fonte: Autor (2021).

A evidência de que quanto menor é a permeabilidade ao ar maior é absorção acústica já foi reportado por outros estudos (ZHU et al., 2015; SEDDEQ, 2009). Porém, em seus trabalhos, as variações das diferenças de permeabilidade dos materiais testados são mais significativas dos que os obtidos nos ensaios.

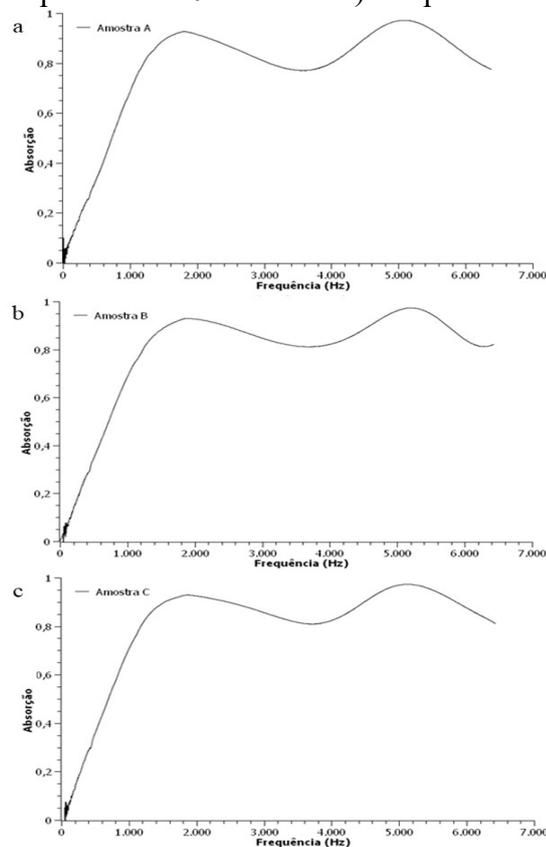
Seddeq (2009) em seu estudo, mantendo a mesma composição de fibras de PET apenas variando a espessura de 7 para 21 mm obteve uma variação de permeabilidade ao ar de mais de 800 %. Enquanto isso, Mevlut et al. (2008) variaram o título direto das fibras de 15 para 3 *denier*, a tortuosidade da superfície das fibras e a densidade das amostras, obtendo variação de permeabilidade ao ar na ordem de 400 %. Em outro estudo, Zhu et al. (2015) ao dobrarem a densidade da amostra, obtiveram um resultado de permeabilidade ao ar 250 % maior.

Nesse sentido, ao comparar as diferenças dos valores que foram obtidos nesse estudo com os valores reportados na literatura, verifica-se que a diferença é muito pequena. Portanto, não influenciou de forma a ser observada nas curvas acústicas dos ensaios realizados.

#### 4.2.3 Absorção acústica das amostras de nãotecidos

Na Figura 47 apresenta-se os valores de absorção acústica identificada para as diferentes amostras de nãotecidos.

Figura 47 – Absorção acústica para as diferentes amostras de nãotecido. a) Grupo A com 24 camadas. b) Grupo B com 40 camadas. c) Grupo C com 58 camadas.



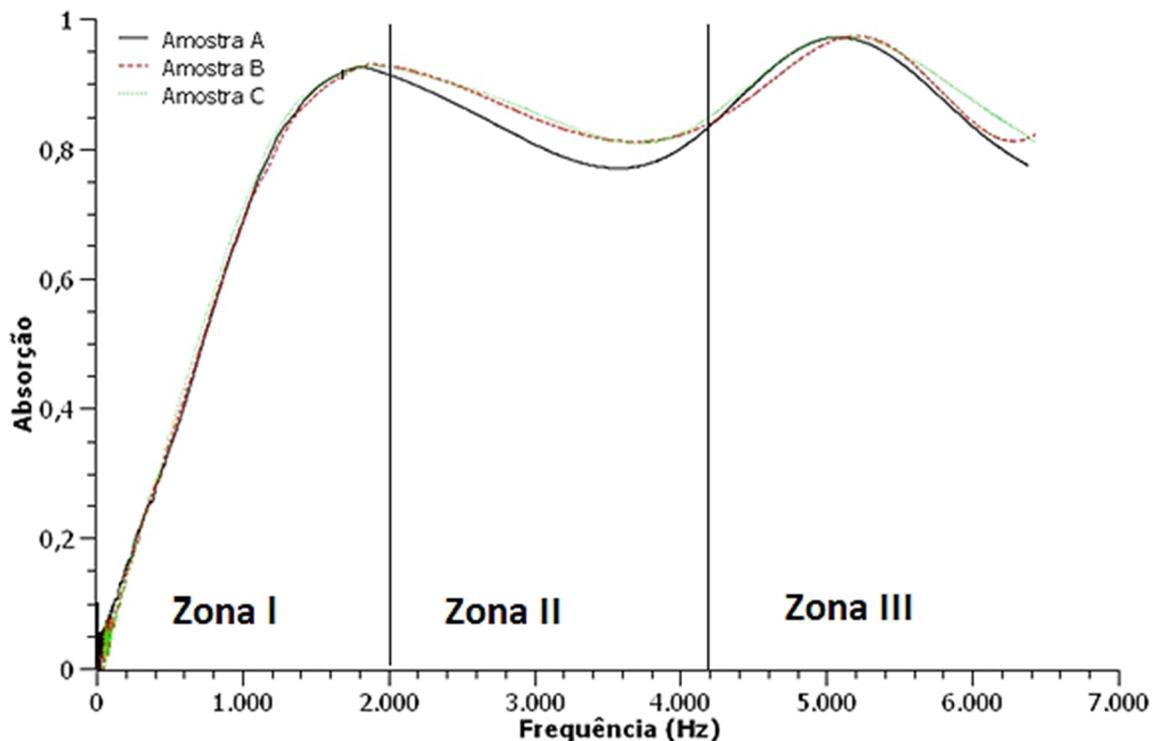
Fonte: Autor (2021).

Os resultados apresentaram dois picos distintos em todas as amostras, os quais correspondem as ressonâncias que se formam ao longo da espessura da amostra ensaiada. A velocidade do som no interior da amostra é menor que aquela de propagação no ar, ou seja, geradas pelo atrito do ar com a superfície das fibras da amostra.

Como a velocidade do som no interior da amostra é menor do que a velocidade do som na propagação livre nos materiais acústicos típicos nas baixas frequências, a velocidade do som no interior do material chega a ser menor do que  $100 \text{ m.s}^{-1}$ . E mesmo em elevadas frequências, a velocidade do som ainda é menor do que ao ar livre.

O valor do NRC calculado foi de 0,5025 para amostras do grupo A, 0,5300 para as amostras do grupo B e 0,5425 para as amostras do grupo C (Figura 47). Quando são sobrepostas as curvas de absorção acústica é possível mais facilmente comparar o comportamento de absorção acústica das diferentes amostras (Figura 48).

Figura 48 – Comparação da absorção acústicas entre as diferentes amostras A, B, e C.



Fonte: Autor (2021).

Baseado na Figura 48, foi possível verificar que as curvas acústicas das amostras praticamente são idênticas, em especial na Zona I, onde a frequência de 0 a 2000 Hz é a região

dos valores de absorção acústica de onde são retirados os dados para o cálculo do NRC (250, 500, 1000 e 2000 Hz).

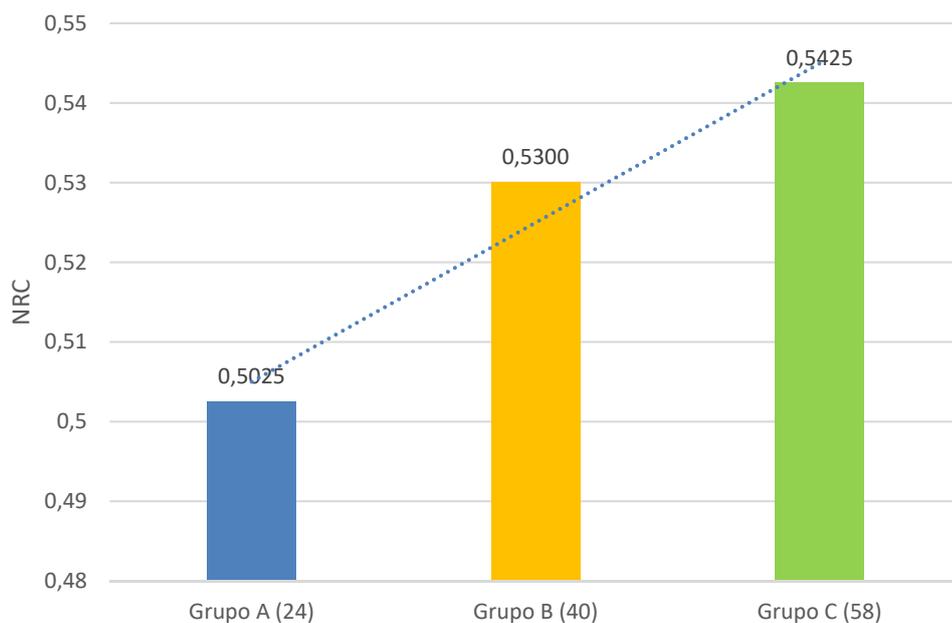
A primeira ressonância (Zona I) ocorre quando a amostra acomoda ao longo da sua espessura um quarto do comprimento de onda do som. O corpo de prova apresenta uma extremidade livre e a outra extremidade está em contato com a parede rígida da terminação do tubo de impedância.

A próxima ressonância (Zona III) é esperada quando a espessura da amostra acomoda três quartos do comprimento de onda, porque novamente temos o som livre na superfície do topo da amostra e velocidade zero ao encontrar a parede rígida do tubo.

A redução da absorção acústica (Zona II), entre as outras duas zonas de ressonância, indica que a resistividade ao fluxo do material pode ser ainda otimizada, chegando ao ponto em que a curva do topo se torne mais plana. Nesta região é onde apresenta a maior diferença de absorção acústica entre três amostras, tendo o grupo A o menor desempenho nesta zona.

Baseado nos valores de NRC foi possível verificar a tendência de que quanto maior o número de camadas da amostra, maior também é o valor do NRC e eficiente é o material em absorver a energia gerada pelas ondas de som (Figura 49). Esta diferença entre os valores de NRC das amostras é verificada na segunda casa decimal, o que na prática não representa necessariamente variações significativas.

Figura 49 – Comparativo do NRC dos grupos de amostras.



Fonte: Autor (2021).

O NRC corresponde a um único número para descrever as características de absorção de um material, sendo que seus valores são para fins de referência geral apenas. No geral, materiais com valores de NRC menores que 0,20 são considerados de reflexão e aqueles com valores maiores que 0,40 são considerados de absorção (PIOVESAN, 2013).

Na Tabela 4 apresenta-se os valores de NRC para alguns materiais normalmente encontrados como revestimentos habitacionais e comerciais, o que comprova a performance da utilização dos nãotecidos como forma de absorvedores acústicos. É possível observar que apenas alguns materiais de revestimento como carpetes e cortinas drapeadas conseguem obter NRC superior a 0,20.

Tabela 4 – Valores de NRC de diferentes materiais e revestimentos de superfície.

Material	Frequências (Hz)				NRC
	250	500	1000	2000	
Alvenaria de tijolos aparentes não pintados	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04
Alvenaria de tijolos aparentes pintados	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Reboco liso sobre alvenaria de tijolos ou blocos	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Alvenaria de blocos aparentes pintados	0,05	0,06	0,07	0,09	0,07
Reboco ou gesso desempenado sobre qualquer alvenaria	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Concreto ou cimento liso desempenado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Azulejos ou pastilhas	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04
Mármore cerâmica ou granito polido	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Assoalho em taboa corrida, com espaço livre até o contrapiso	0,30	0,20	0,17	0,15	0,21
Tacos de madeira colados sobre contrapiso	0,05	0,10	0,20	0,30	0,16
Carpete tipo forração simples colado no contrapiso	0,05	0,10	0,20	0,30	0,16
Carpete tipo forração alto tráfego	0,10	0,15	0,30	0,50	0,26
Carpete de náilon 6 mm sobre manta de feltro	0,10	0,10	0,30	0,40	0,23
Carpete de náilon 10 mm colado sobre contrapiso	0,15	0,30	0,40	0,50	0,34
Paviflex colado sobre contrapiso desempenado	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Cortina de tecido, esticada, em contato com a parede	0,04	0,11	0,17	0,24	0,14
Cortina de tecido médio, drapeada em 50% da área	0,31	0,49	0,75	0,70	0,56
Cortina de tecido pesado, drapeada em 50% da área	0,35	0,55	0,72	0,70	0,58
Superfície de água (piscina, espelhos d'água)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Vidro fixo laminado ou temperado de grande superfície	0,06	0,04	0,03	0,02	0,04
Vidro comum montado em caixilhos	0,25	0,18	0,12	0,07	0,16
Divisória de gesso <i>drywall</i> com ou sem enchimento	0,08	0,05	0,03	0,03	0,05
Divisória de lambri de madeira compensada	0,22	0,07	0,04	0,03	0,09
Forro de gesso acartonado com ou sem enchimento	0,08	0,05	0,03	0,03	0,05
Assoalho de taboa corrida sobre contrapiso	0,11	0,10	0,07	0,05	0,08
Porta de madeira comum pintada ou envernizada	0,19	0,14	0,08	0,13	0,14
Porta acústica, com faces de madeira pintada ou envernizada	0,11	0,10	0,07	0,06	0,09

Fonte: Adaptado de Piovesan (2013).

#### 4.2.4 Análise de produtividade das amostras de nãotecido

Considerando que as diferentes amostras de nãotecido possuíam a mesma espessura (50 mm) e gramatura ( $1500 \text{ g.m}^{-2}$ ), com uma variação apenas no número de camadas de véu (24, 40 e 58 camadas) e conseqüentemente, na velocidade de produção (Tabela 5), identificou-se uma variação do desempenho de produtividade entre as amostras. Esse fato está relacionado diretamente com o número de camadas de véu presente em cada amostra. De forma geral, quanto menor o número de camada de véu, maior foi a produtividade das amostras. A amostra A, com 24 camadas, apresentou uma produção de 31,98 % e 52,05 % superior, quando comparadas as amostras B e C com 40 e 58 camadas, respectivamente.

Tabela 5 – Desempenho de produtividade das diferentes amostras de nãotecidos.

Amostra	Número de camadas	Produção da carda ( $\text{Kg.h}^{-1}$ )	Velocidade produção ( $\text{m.min}^{-1}$ )	*Produção de cardas ( $\text{Kg.d}^{-1}$ )
A	24	832	2.3	19.968
B	40	566	1.7	13.584
C	58	399	1.1	9.576

\*Nota: Considerando um período de produção de 24 horas.

Fonte: Autor (2021).

Se for considerar o desempenho de produção das diferentes amostras ao longo de um mês, a amostra A possui um desempenho de 47 % ( $191.520,00 \text{ Kg.mês}^{-1}$ ) e 108 % ( $311.769 \text{ Kg.mês}^{-1}$ ) superior ao comparado as amostras B e C, respectivamente. Para nãotecidos com menor número de camadas a carda produz um véu de maior gramatura, desta forma sua produção em  $\text{Kg.mês}^{-1}$  é maior. À medida que é aumentada a quantidade de camadas na amostra de nãotecido, o véu produzido pela carda diminui sua gramatura, reduzindo também sua produção em  $\text{Kg.mês}^{-1}$  e conseqüentemente a velocidade de produção. Segundo Raghvendra e Sravanthi (2017), produzir um nãotecido com camadas de véus mais espessas ocasiona um maior desempenho de produção. Esse comportamento está associado com os ajustes do equipamento, os quais são menos rígidos na carda, permitindo uma maior velocidade de produção em menos tempo de processamento, menor consumo de energia, maior coesão entre as fibras e conseqüentemente maior resistência.

## 5 CONCLUSÃO

Baseado na avaliação da resistência à tração, permeabilidade ao ar, absorção acústica e produtividade de diferentes grupos de não tecidos com distintos números de camadas (24, 40 e 58 camadas), conclui-se:

O grupo de amostras de não tecido com 24 camadas de véus apresentou a melhor resistência à tração quando comparado com os outros dois. Nesse sentido, a produção de não tecidos com um menor número de camadas é indicado quando o objetivo é obter maior resistência mecânica.

O grupo de amostras de não tecido com 24 camadas de véu apresentou a maior permeabilidade ao ar quando comparado com os outros dois. No entanto, a diferença dos valores de permeabilidade ao ar entre as diferentes amostras foi pequena, não influenciando de forma significativa no desempenho de absorção acústica.

O valor do NRC é de 0,5025 para amostras de não tecido com 24 camadas, 0,5300 para as amostras com 40 camadas e 0,5425 para as amostras com 58 camadas. Identificou-se uma relação entre o número de camadas do não tecido e a capacidade de absorção acústica das amostras. Um não tecido formado por um maior número de camadas de véus apresentou um melhor desempenho acústico quando comparado ao que possui menor número de camadas. Entretanto, os resultados de NRC apresentaram uma diferença extremamente pequena no que tange os valores acústicos perceptíveis e representativos, bem como quando observada as curvas acústicas na amplitude do espectro de frequências ensaiadas, permitindo assim considerar na prática os resultados sendo similares.

A análise de produtividade mostrou que a produção de um véu de maior gramatura e um não tecido com menor número de camadas é o que apresentou o melhor resultado econômico, resultando em menores gastos por quilo de material produzido.

Considerando as curvas de absorção acústica, torna-se evidente o potencial ainda a ser explorado nesta temática, com o intuito de desenvolver melhor desempenho acústico dos não tecidos em frequências.

## 6 RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se citar algumas sugestões para serem conduzidas em trabalhos futuros, tais como:

- i. Avaliar como a variação do título de fibra afeta a resistência à tração do não tecido;
- ii. Potencializar a absorção acústica do não tecido buscando reduzir o vale na Zona II da curva de absorção acústica;
- iii. Estudar a relação entre a variação do título das fibras e a absorção acústica do não tecido para uma mesma densidade e espessura;
- iv. Estudar se a produção de um não tecido totalmente com fibras recicladas difere suas características de resistência à tração e acústicas quando comparado a produção com fibras virgens.

## REFERÊNCIAS

ABIPET - Associação Brasileira de Indústria do PET. **Decimo censo da reciclagem de PET no Brasil**, 2016. Disponível em: [www.ABIPET.org.br](http://www.ABIPET.org.br). Acesso em: 08. Out. 2021.

ACIMIT - ASSOCIAÇÃO ITALIANA DE FABRICANTES DE MÁQUINAS. **Reference Books of Textile Technologies the Nonwovens**: ACIMIT, 2008, 235p.

ALBRECHT, Wilhelm; FUCHS, Hilmar; KITTELMANN, Walter. **Nonwoven Fabrics: Raw Materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing Processes**. EUA: Industrial Chemistry, 2005. 772 p.

ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. **A Química do Processamento Têxtil**. São Paulo: Química Nova, 1996. 234 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM C384-04(2016)**: Standard Teste for Impedance and Absorption of Acoustical Material by Impedance Tube Method. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM C423 – 72 (2017)**: Standard teste for impedance tube and Absorption of Acoustic Material by Impedance Tube Method. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM D1577-07(2018)**: Standard Teste Methods for Linear Density of Textile Fibers. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM E 336-71**: Standard Test Method for Measurement of Airbone Sound Attenuation Between Rooms in Buildings. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM D1564- (1971)**: Standard Methods of Testig Slab Flexing Urethane Foam. 1971.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1050-19**: Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System. 2019.

ASDRUBALI, Francesco; D'ALESSANDRO, Francesco; SCHIAVONI, Samuele. A review of unconventional sustainable building insulation materials. **Sustainable Materials And Technologies**, [S.L.], v. 4, p. 1-17, jul. 2015. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE NÃOTECIDOS ABINT (São Paulo). **Nãotecidos e feltros: importações x exportações. 2020**. Disponível em: <https://www.abint.org.br/>. Acesso em: 01 ago. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE NÃOTECIDOS ABINT (São Paulo). **Números do setor de não tecido mostram pequeno crescimento em 2019**. 2020. Disponível em: <https://www.abint.org.br/>. Acesso em: 25 fev. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15575**: Desempenho em Edificações Habitacionais. 1 ed. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 16832**: Sistemas construtivos em chapas de gesso para drywall- Lãs de PET para isolamento térmico e acústico – Requisitos e métodos de ensaio. 1 ed. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13370**: Não tecido - Terminologia. 1 ed. Rio de Janeiro, 2017.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO DRYWALL**. Disponível em: <<https://drywall.org.br/acustica/>>. Acesso em: 01 set, 2021.

**AUTEFA Solutions**. Disponível em: <[https://www.autefa.com/fileadmin/user\\_upload/Nonwovens/Downloads/AUTEFA\\_Solutions\\_Nonwoven\\_Lines.pdf](https://www.autefa.com/fileadmin/user_upload/Nonwovens/Downloads/AUTEFA_Solutions_Nonwoven_Lines.pdf)>. Acesso em: 12 mai. de 2020.

BENATTO, Carlos Eduardo. **Nãotêcidos e têcidos técnicos priorizam construção**. 2016. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/naotêcidos-têcidos-tênicos>. Acesso em: 01 fev. 2020.

BERTOLOTI, Bruno; CHÁVEZ, Jorge; LAOS, Roberto; ROSPIGLIOSI, Carla; NAKAMATSU, Javier. Poliésteres y Reciclaje Químico del Poli(tereftalato de etileno). **Revista de Química**, [s. l], v. 1, n. 1, p. 13-20, jul. 2005.

CARVALHO, R.; RANA, S.; FANGUEIRO, R.; SOUTINHO, F.. Noise reduction performance of thermobonded nonwovens. In: **12<sup>TH</sup> WORLD TEXTILE CONFERENCE AUTEX**, 12., 2012, Zadar. Anais. Zadar: Autex, 2012. v. 1, p. 597-600.

**EDANA - ASSOCIAÇÃO EUROPEIA DE DESCARTÁVEIS E NÃOTECIDOS**. Disponível em: <<https://www.edana.org/nw-related-industry/nonwovens-markets>>. Acesso em: 10 mai. de 2020.

FARUKH, Farukh; DEMIRCI, Emrah; SABUNCUOGLU, Baris; ACAR, Memiş; POURDEYHIMI, Behnam; SILBERSCHMIDT, Vadim V.. Mechanical analysis of bi-component-fibre nonwovens: finite-element strategy. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 68, p. 327-335, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.09.003>.

GARAI, Massimo; POMPOLI, Francesco. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. **Applied Acoustics**, [S.L.], v. 66, n. 12, p. 1383-1398, dez. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.04.008>.

HEJAZI, Fatemeh; MIRZADEH, Hamid; CONTESSI, Nicola; TANZI, Maria Cristina; FARÉ, Silvia. Novel class of collector in electrospinning device for the fabrication of 3D nanofibrous structure for large defect load-bearing tissue engineering application. **Journal Of Biomedical Materials Research Part A**, [S.L.], v. 105, n. 5, p. 1535-1548, 21 mar. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/jbm.a.35822>.

HORROCKS, A. Richard; ANAND, Subhash C.. **Handbook of Technical Textiles**. 2. ed. Estados Unidos: Elsevier, 2000. 394 p.

IBP - Instituto Brasileiro de petróleo e Gás. **Evolução da produção de energia primária no Brasil**. 2020. Disponível em: < <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/producao-de-energia-primaria-brasil/>. Acesso em: 01 out. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10534-2 (1998): Acoustics- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes- Part 2 : Transfer-function method**. 1998.

INTINI, Francesca; KÜHTZ, Silvana. Recycling in buildings: an LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer pet bottles. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 306-315, 16 mar. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0267-9>.

JAYARAMAN, Kannan Allampalayam. **Acoustical Absorptive Properties of Nonwovens**. 2005. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Textile Management And Technology, University Of Mancheste, , Carolina do Norte, 2005.

KIM, H.s.; POURDEYHIMI, B.. The Role of Structure On Mechanical Properties of Nonwoven Fabrics. **Inj Summer**, Florida, v. 1, n. 1, p. 32-37, 2001.

LIAO, Tianyi; ADANUR, Sabit; DREAN, Jean-Yves. Predicting the Mechanical Properties of Nonwoven Geotextiles with the Finite Element Method. **Textile Research Journal**, [S.L.], v. 67, n. 10, p. 753-760, out. 1997. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/004051759706701008>.

METISSUE. **The magazine for the hygienic industry**. 2020. Disponível em: <https://www.metissue.com/>. Acesso em: 01 jan. 2020.

Muhammad Kamran Iqbal. **The applications of nonwovens in technical textiles: Technical textile and nonwovens**, 2009, 234p.

MÜLLER, ECKARD MOMMERTZ. **Acústica e Isolamento Acústico**: UTE Scienze Tecniche Milão, 2009, 312p.

NARANG, P.P. Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption. **Applied Acoustics**, [S.L.], v. 45, n. 4, p. 335-358, 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-682x\(95\)00007-v](http://dx.doi.org/10.1016/0003-682x(95)00007-v).

NASSAR, Khaled Mansour Abdel Hafez. **Thermobonded 3D Nonwoven Wool Structures**. 2010. 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculty Of Engineering And Physical Sciences, University Of Manchester, Manchester, 2010.

NISKANEN, M.; GROBY, J.-P.; DUCLOS, A.; DAZEL, O.; ROUX, J. C. Le; POULAIN, N.; HUTTUNEN, T.; LÄHIVAARA, T.. Deterministic and statistical characterization of rigid frame porous materials from impedance tube measurements. **The Journal Of The Acoustical Society Of America**, [S.L.], v. 142, n. 4, p. 2407-2418, out. 2017. Acoustical Society of America (ASA). <http://dx.doi.org/10.1121/1.5008742>.

PATNAIK, Asis; MVUBU, Mlando; MUNIYASAMY, Sudhakar; BOTHA, Anton; ANANDJIWALA, Rajesh D.. Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 92, p. 161-169, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.056>.

PEDROSO, M.; BRITO, J. de; SILVESTRE, J.D.. Characterization of eco-efficient acoustic insulation materials (traditional and innovative). **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 140, p. 221-228, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.132>.

PENTA transactions: **PENTA transactions Estatísticas online**. PENTA transactions Estatísticas online. 2020. Disponível em: <https://penta-transaction.com/PortalPenta/inicio>. Acesso em: 01 out. 2020.

PEPELS, Mark P. F.; HANSEN, Michael Ryan; GOOSSENS, Han; DUCHATEAU, Rob. From Polyethylene to Polyester: influence of ester groups on the physical properties. **Macromolecules**, [S.L.], v. 46, n. 19, p. 7668-7677, 25 set. 2013. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ma401403x>.

PIOVESAN, Tenile Rieger. **Caracterização acústica de dois sistemas modulares de telhados verdes brasileiros**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

Raghvendra, KM; Sravanthi, L. Fabrication Techniques of Micro/Nano Fibres based Nonwoven Composites: a review. **Modern Chemistry & Applications**, [S.L.], v. 05, n. 02, p. 1000206-1000206, 2017. OMICS Publishing Group. <http://dx.doi.org/10.4172/2329-6798.1000206>.

REWALD, Freddy Gustavo. Tecnologia Dos Naotecidos - Matérias-Primas, Processos E Aplic. Finais. São Paulo: Lcte, 2016. 207 p.  
Russell, S.J. **Handbook of Nonwovens**. Florida: Woodhead Publishing Limited 2007, 234p.

SEDDEQ, Hoda S.. Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials. **Australian Journal Of Basic And Applied Sciences**, Australian, v. 4, n. 3, p. 4610-4617, 2009.

SEGURA-ALCARAZ, Pilar; SEGURA-ALCARAZ, Jorge; MONTAVA, Ignacio; BONET-ARACIL, Marilés. The Use of Fabrics to Improve the Acoustic Absorption: influence of the woven fabric thread density over a nonwoven. **Autex Research Journal**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 269-280, 1 set. 2018. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/aut-2018-0006>.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; PAOLI, Marco Aurelio de. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 65-72, fev. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422005000100014>.

TASCAN, Mevlut; VAUGHN, Edward A.. Effects of Fiber Denier, Fiber Cross-Sectional Shape and Fabric Density on Acoustical Behavior of Vertically Lapped Nonwoven Fabrics. **Journal Of Engineered Fibers And Fabrics**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 155892500800300, jun. 2008. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/155892500800300206>.

ZHU, Wenbin; NANDIKOLLA, Vidya; GEORGE, Brian. Effect of Bulk Density on the Acoustic Performance of Thermally Bonded Nonwovens. **Journal Of Engineered Fibers And Fabrics**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 155892501501000, set. 2015. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/155892501501000316>.

**ANEXO A – Tabela de relação entre massa e resultado esperado fornecido pelo fabricante do equipamento.**

# VIBROSKOP 400



## 4.5. Table – tension weights

pretension weight in use	recommended range of result		
30 mg	0,30 - 0,70	dtex /	0,27 - 0,63 den
50 mg	0,50 - 1,20	dtex /	0,45 - 1,08 den
70 mg	0,70 - 1,70	dtex /	0,63 - 1,53 den
100 mg	1,00 - 2,40	dtex /	0,90 - 2,16 den
150 mg	1,50 - 3,60	dtex /	1,35 - 3,24 den
200 mg	2,00 - 4,80	dtex /	1,80 - 4,32 den
300 mg	3,00 - 7,00	dtex /	2,70 - 6,30 den
500 mg	5,0 - 12,0	dtex /	4,5 - 10,8 den
700 mg	7,0 - 17,0	dtex /	6,3 - 15,3 den
1000 mg	10,0 - 24,0	dtex /	9,0 - 21,6 den
1500 mg	15,0 - 36,0	dtex /	13,5 - 32,4 den
2000 mg	20,0 - 48,0	dtex /	18,0 - 43,2 den
3000 mg	30,0 - 70,0	dtex /	27,0 - 63,0 den
5000 mg	50 - 120	dtex /	45 - 108 den
7000 mg	70 - 170	dtex /	63 - 153 den