



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

Paulo Sergio Deucher

**Desenvolvimento de nãotecido a partir de fibras virgens e recicladas de poliéster para  
aplicação em isolamento térmico**

Blumenau  
2023

Paulo Sergio Deucher

**Desenvolvimento de nãotecido a partir de fibras virgens e recicladas de poliéster para aplicação em isolamento térmico**

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>. Andrea Cristiane Krause Bierhalz, Dra.  
Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Fernanda Steffens, Dra.

Blumenau

2023

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

Deucher, Paulo Sergio

Desenvolvimento de nãotecido a partir de fibras virgens e recicladas de poliéster para aplicação em isolamento térmico / Paulo Sergio Deucher ; orientadora, Andrea Cristiane Krause Bierhalz, coorientador, Fernanda Steffens, 2023.

88 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Desempenho térmico. 3. Fibra reciclada. 4. Poliéster. 5. Condutividade. I. Krause Bierhalz, Andrea Cristiane. II. Steffens, Fernanda . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil. IV. Título.

Paulo Sergio Deucher

**Desenvolvimento de não tecido a partir de fibras virgens e recicladas de poliéster para aplicação em isolamento térmico**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em de março de 2023, por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. José Alexandre Borges Valle, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. José Ivan de Medeiros, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande Do Norte

Prof.(a) Andrea Cristiane Krause Bierhalz, Dr.(a)  
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.(a) Fernanda Steffens, Dr.(a)  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof.(a) Andrea Cristiane Krause Bierhalz, Dr.(a)  
Orientador(a)

Blumenau, 2023.

“Aquele que tiver paciência terá o que deseja.”  
(Benjamin Franklin)

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Suelen Patricia Eger, que sempre esteve ao meu lado apoiando e dando força, amor e carinho para me manter nesta jornada.

À minha orientadora Dr<sup>a</sup> Andrea Cristiane Krause Bierhalz da UFSC, Campus Blumenau, por sua paciência e persistência, nesta jornada que não foi fácil.

Ao Sr. Eduardo Volkart da Rosa, gerente da empresa em que atuo, que incentivou e apoiou para realizar o mestrado.

Ao Laboratório Central de Microscopia (LCME), ao Laboratório Interdisciplinar para o Desenvolvimento de Nanoestruturas (LINDEN), à Central de Análises do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos e ao Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) da UFSC pelo apoio nas análises.

## RESUMO

Visando a conservação dos recursos naturais e a proteção do meio ambiente, a economia de energia tornou-se um objetivo estratégico em todo o mundo. Um dos segmentos que mais contribui com o consumo de energia é o das edificações residenciais e comerciais, como resultado do uso de aquecimento e resfriamento para garantir um ambiente termicamente confortável. Portanto, há uma busca contínua por encontrar as alternativas adequadas para reduzir este consumo por meio de sistemas de isolamento térmico. Dentre as alternativas, a utilização de nãotecidos constituídos por fibras sintéticas tem recebido crescente atenção. Diante disso, o objetivo desse estudo foi desenvolver nãotecidos para isolamento térmico constituídos de fibras de poliéster virgens e fibras recicladas de garrafa PET. Foi avaliada a influência da substituição das fibras virgens ocas em uma formulação padrão por fibras sólidas recicladas em distintas proporções (20–60 %). Foi também avaliada a utilização de uma fibra comercial contendo silicone em sua formulação (20 e 40 %). As fibras utilizadas foram caracterizadas em relação à morfologia e composição química por espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier. As amostras de nãotecido foram avaliadas quanto à condutividade térmica, permeabilidade ao ar, cristalinidade e comportamento térmico por termogravimetria (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC). A análise da composição química das fibras evidenciou que as fibras virgens e recicladas apresentam os grupos característicos do poliéster, sem indícios da presença de outros polímeros. Foi evidenciado que a utilização de 20 % de fibra reciclada não comprometeu as propriedades térmicas do nãotecido e reduziu significativamente a permeabilidade ao ar, sendo que a diferença de título direto não influenciou o processo de produção e as propriedades. A utilização de proporções de 40 e 60 % de fibra reciclada reduziu significativamente a condutividade térmica e a permeabilidade ao ar das amostras. A estabilidade térmica das amostras não foi alterada pela utilização da fibra reciclada, já a cristalinidade aumentou ligeiramente. O uso da fibra siliconada prejudicou a consolidação da estrutura e, embora tenha reduzido a condutividade térmica e a permeabilidade ao ar, apresentou comportamento de queima com elevado derretimento da amostra. De forma geral, o presente estudo demonstrou que a utilização de até 40 % de fibra reciclada de PET contribuiu para a melhoria do isolamento térmico de amostras de nãotecido e é promissora para uma aplicação têxtil mais sustentável.

**Palavras-chave:** Desempenho térmico. Fibra reciclada. Poliéster. Condutividade.

## ABSTRACT

Aiming at conserving natural resources and protecting the environment, energy-saving has become a strategic objective all over the world. One of the segments that most contributes to energy consumption is residential and commercial buildings, as a result of the use of heating and cooling to ensure a thermally comfortable environment. Therefore, there is a continuous search to find suitable alternatives to reduce this consumption through thermal insulation systems. Among the options, using nonwovens made of synthetic fibers has received increasing attention. Therefore, this study aims to develop nonwovens for thermal insulation made of virgin polyester fibers and recycled fibers from PET bottles. The influence of replacing hollow virgin fibers in a standard formulation with solid recycled fibers in different proportions (20–60%) was evaluated. The use of a commercial fiber containing silicone (20 and 40%) was also evaluated. The fibers were characterized in terms of morphology and chemical composition by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The nonwoven samples were evaluated regarding thermal conductivity, air permeability, crystallinity, and thermal behavior by thermogravimetry (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC). The analysis of the fibers chemical composition showed that the virgin and recycled fibers present the characteristic groups of polyester, without evidence of the presence of other polymers. It was evidenced that the use of 20% of recycled fiber did not compromise the thermal properties of the nonwoven and significantly reduced the air permeability, and the difference in title did not influence the production process and properties. The use of proportions of 40 and 60% significantly reduced the thermal conductivity and air permeability of the samples. The thermal stability of the samples was not altered by the use of recycled fiber, but the crystallinity slightly increased. The use of siliconized fiber impaired the consolidation of the structure and. Although they reduced the thermal conductivity and air permeability, they showed a burning behavior with high melting of the sample. In general, the present study demonstrated that the use of up to 40% of recycled PET fiber contributed to the improvement of the thermal insulation of nonwoven samples and is promising for a more sustainable textile application.

**Keywords:** Thermal performance. Recycled fiber. Polyester. Conductivity.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismo de transferência de calor por condução .....	20
Figura 2 – Faixa de condutividade térmica de diferentes materiais em temperatura ambiente	23
Figura 3 - Principais materiais comerciais utilizados como isolantes térmicos .....	25
Figura 4 - Classificação das fibras têxteis .....	28
Figura 5 - Estrutura molecular do poliéster .....	29
Figura 6 - Formação de manta de não-tecido composto por vários véus.....	31
Figura 7 - Tipos de consolidação de fibras: a) consolidação térmica por cilindros aquecidos; b) consolidação mecânica; c) consolidação química .....	32
Figura 8 - Representação esquemática das etapas da pesquisa .....	36
Figura 9 - Fardos de fibras nos carregadores.....	40
Figura 10 – Equipamentos utilizados para a produção do não-tecido: 1) carda; 2) dobrador de véus e 3) forno para consolidação .....	41
Figura 11 – Representação do dispositivo de medida da condutividade térmica das amostras de não-tecido.....	43
Figura 12 – Esquema do ensaio de queima vertical realizado nas amostras de não-tecido .....	45
Figura 13 – Fotografias das fibras utilizadas para a produção dos não-tecidos.....	46
Figura 14 – Imagens de MEV das fibras utilizadas para a produção dos não-tecidos: Bi-4,4 (a-b), HC-15 (c-d) e SR-3,3 (e-f) .....	47
Figura 15 – Imagem de microscopia óptica da seção transversal da fibra bicomponente Bi-4,4. ....	48
Figura 16 – Espectro FTIR das fibras HR-11, HC-8, HC-15 (a) e SR-3,3,SR-1,4 (b).....	49
Figura 17 – Espectro FTIR resultante das fibras Bi-4,4, SR-1,4, HR-11 .....	51
Figura 18 – Aspecto macroscópico da superfície e da seção transversal das amostras controle, A e B.....	52
Figura 19 - Permeabilidade ao ar para as amostras controle, A e B.....	54
Figura 20 – Difração de raios X das amostras controle, A e B .....	56
Figura 21 – Aspecto macroscópico da superfície e da seção transversal das amostras B, C e D .....	58
Figura 22 - Permeabilidade ao ar para as amostras controle, B, C e D .....	60
Figura 23 – Termogramas de fluxo de calor das amostras controle, B, C e D .....	62
Figura 24 – Curvas termogravimétricas das amostras controle, B, C e D.....	63

Figura 25 - Difração de raios X para as amostras controle, B, C e D .....	64
Figura 26 – Imagem (a) e micrografias da superfície (b) e da seção transversal (c) da fibra HCS-3,3 .....	65
Figura 27 – Espectros de FTIR da fibra térmica (HC-3,3) e da fibra HC-15.....	66
Figura 28 – Aspecto macroscópico da superfície e seção transversal das amostras confeccionadas com 20 % (E) e 40 % (F) de fibra térmica.....	67
Figura 29 - Consolidação da amostra F .....	68
Figura 30 – Permeabilidade ao ar para as amostras controle, E e F.....	70
Figura 31 – Difração de raios X para as amostras controle, E e F.....	71
Figura 32 – Termogramas de fluxo de calor das amostras controle, E, e F .....	72
Figura 33 – Análise termogravimétrica (a) e derivada da perda de massa (b) das amostras controle, E, e F.....	72
Figura 34 – Resultados do teste de chama aplicado nas diferentes amostras de não-tecido. ....	74
Figura 35 – Resultados do teste de chama aplicado nas diferentes amostras de não-tecido: a) amostras E; b) amostra F. ....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das fibras utilizadas para a produção dos não tecidos .....	37
Tabela 2 – Descrição das fibras de poliéster utilizadas na composição dos não tecidos .....	38
Tabela 3 – Descrição das fibras de poliéster utilizadas na composição dos não tecidos. ....	39
Tabela 4 – Quantificação das propriedades térmicas das diferentes amostras avaliadas .....	53
Tabela 5 – Quantificação das propriedades térmicas das diferentes amostras avaliadas. ....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABIT - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ASTM - American Society for Testing and Materials.
- ATR - Refletância total atenuada.
- BI – Bicomponente.
- CB3E - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações.
- CFM - Cubic Feet Minute.
- DIN - Isolamento térmico e economia de energia em edifícios.
- DSC - Calorimetria exploratória diferencial.
- FTIR - Espectrofotometria no infravermelho por transformada de Fourier.
- HC – Oca conjugada.
- HCS – Oca conjugada siliconada.
- HR – Oca regular.
- ISO - International Organization for Standardization.
- LCME - Laboratório Central de Microscopia Eletrônica.
- MEV - Microscopia eletrônica de varredura.
- NBR – Normas técnicas brasileira.
- ASTM - American Society for Testing and Materials.
- PES – Poliéster.
- PET - Polietileno tereftalato.
- PTT - Politrimetileno tereftalato.
- SR – Sólida regular
- TGA - Análise termogravimétrica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>17</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	ISOLAMENTO térmico.....	18
2.2	TRANSFERÊNCIA de calor EM SISTEMAS DE ISOLAMENTO .....	19
2.2.1	<b>Condução.....</b>	<b>19</b>
2.2.2	<b>Resistencia térmica.....</b>	<b>21</b>
2.3	Propriedades dos materiais utilizados como isolantes térmicos.....	22
2.3.1	<b>Condutividade térmica.....</b>	<b>22</b>
2.4	Materiais empregados como isolantes térmicos.....	25
2.5	Nãotecidos.....	27
2.5.1	<b>Fibras utilizadas para a produção de nãotecidos .....</b>	<b>27</b>
2.5.2	<b>Processo de fabricação de nãotecidos .....</b>	<b>30</b>
2.6	UTILIZAÇÃO DE NÃOTECIDOS COMO ISOLANTES TÉRMICOS .....	33
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1	MATERIAIS .....	36
3.1.1	<b>Composição das amostras de nãotecidos.....</b>	<b>38</b>
3.2	MÉTODOS.....	40
3.2.1	<b>Produção das amostras de nãotecidos .....</b>	<b>40</b>
3.2.2	<b>Caracterização das fibras .....</b>	<b>41</b>
3.2.2.1	<i>Aspecto macroscópico e microscópico.....</i>	<i>41</i>
3.2.2.2	<i>Espectrofotometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....</i>	<i>42</i>
3.2.3	<b>Caracterização dos nãotecidos .....</b>	<b>42</b>
3.2.3.1	<i>Aspecto macroscópico e microscópico.....</i>	<i>42</i>
3.2.3.2	<i>Determinação da condutividade e resistência térmica .....</i>	<i>42</i>
3.2.3.3	<i>Análise termogravimétrica (TGA).....</i>	<i>43</i>
3.2.3.4	<i>Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....</i>	<i>44</i>

3.2.3.5	<i>Difração de raios X</i> .....	44
3.2.3.6	<i>Permeabilidade ao ar</i> .....	44
3.2.3.7	<i>Teste de queima vertical</i> .....	44
<b>3.2.4</b>	<b>Análise estatística</b> .....	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>46</b>
4.1	Caracterização das fibras.....	46
4.1.1	<b>Aspecto macroscópico e microscópico</b> .....	<b>46</b>
4.1.2	<b>Caracterização dos grupos funcionais das fibras</b> .....	<b>48</b>
4.2	Desenvolvimento de não tecidos com fibra reciclada: substituição de 20 %.....	51
4.2.1	<b>Aspecto macroscópico dos não tecidos</b> .....	<b>51</b>
4.2.2	<b>propriedades térmicas</b> .....	<b>52</b>
4.2.3	<b>Permeabilidade ao ar</b> .....	<b>54</b>
4.2.4	<b>Difração de raios X</b> .....	<b>55</b>
4.3	EFEITO DA PROPORÇÃO DE FIBRA RECICLADA NAS PROPRIEDADES DOS NÃO TECIDOS.....	57
4.3.1	<b>Aspecto macroscópico</b> .....	<b>58</b>
4.3.2	<b>Propriedades térmicas</b> .....	<b>59</b>
4.3.3	<b>Permeabilidade ao ar</b> .....	<b>60</b>
4.3.4	<b>DSC</b> .....	<b>61</b>
4.3.5	<b>Análise termogravimétrica</b> .....	<b>63</b>
4.3.6	<b>Difração de raios X</b> .....	<b>64</b>
4.4	DESEMPENHO DA FIBRA COMERCIAL TÉRMICA.....	64
4.4.1	<b>Caracterização da fibra térmica</b> .....	<b>65</b>
4.4.1.1	<i>Aspecto macroscópico e microscópico</i> .....	65
4.4.1.2	<i>FTIR</i> .....	65
4.4.2	<b>Desenvolvimento de não tecido com a fibra térmica</b> .....	<b>67</b>
4.4.2.1	<i>Aspecto macroscópico</i> .....	67
4.4.2.2	<i>Propriedades térmicas</i> .....	68
4.4.2.3	<i>Permeabilidade ao ar</i> .....	69
4.4.2.4	<i>Difração de raios X</i> .....	70
4.4.2.5	<i>DSC</i> .....	71

4.4.2.6	<i>Análise termogravimétrica</i> .....	72
4.4.3	<b>Teste de queima</b> .....	73
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	75
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	77





## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a industrialização e o aumento populacional em conjunto com a possibilidade do esgotamento de recursos naturais tem tornado crescente a preocupação sobre a preservação e o consumo consciente da energia (VELOSO, 2022). Nesse sentido, a gradativa ameaça do aquecimento global e das mudanças climáticas aumentou a conscientização sobre a relação entre o desenvolvimento econômico, o uso de energia e a sustentabilidade ambiental (LEAN; SMYTH, 2010).

Especialmente, o ramo da construção civil associado a edificações é um dos setores que mais faz utilização de energia, correspondendo a uma porção superior de consumo que o setor de transporte em muitos países desenvolvidos. Em linhas gerais, os edifícios representam cerca de 40 % do consumo global de energia e contribuem em mais de 30 % de emissão de CO<sub>2</sub> (ZHAI et al., 2022; CHAI et al., 2016).

Assim, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos para melhorar a eficiência energética dos edifícios, tais como análise do ciclo de vida, viabilidade técnica e econômica de medidas de eficiência energética, controles e instalações de aquecimentos, ventilação natural, sistemas de iluminação inteligente, revestimentos refletivos e isolamento térmico (MELGAR; MÁRQUES, 2022; HUANG; NIU; CHUNG., 2013; GOYAL; INGLEY; BAROOAH, 2013; MARINAKIS et al., 2013).

Dentre as alternativas citadas, o isolamento térmico é muitas vezes o primeiro passo para a redução do requerimento de energia em um edifício, resultando na diminuição do consumo de energia de aquecimento e/ou ar-condicionado e no aumento do conforto térmico. Diante disso, o mercado da construção civil pode ser considerado o mais importante, no âmbito do desenvolvimento de materiais que possuam capacidade de isolamento térmico e que sejam também de fácil operação, manutenção e de baixo custo associado (RABBAT et al., 2022; WANG; YU; PAN, 2007). De acordo com a literatura especializada, um bom isolamento poderia economizar cerca de 65 % do consumo de energia (WAZNA et al., 2018; HADDED et al., 2016). Portanto, torna-se evidente que os desafios do mercado produtivo de materiais de isolamento térmico são certamente amplos, apelando por uma cooperação entre a comunidade científica, a indústria e as autoridades legislativas (YUAN et al., 2022).

Diferentes tipos de materiais são utilizados como isolantes térmicos, desde aqueles de origem mineral, sintética, até vegetal e animal (BOZSAKY, 2010). Dentre os diversos tipos de substratos disponíveis para isolamento, a utilização de nãotecidos vem sendo apontada como uma alternativa viável por diferentes estudos e já vem sendo empregada há

várias décadas (WANG; YU; PAN, 2007; FU; MAI, 2003). Características dos não tecidos como porosidade, flexibilidade e baixa densidade são atrativas para aplicações como isolamento térmico (KUMAR; THILAGAVATHI; KARTHIKKA, 2020).

Nesse sentido, pesquisas já foram conduzidas buscando elucidar o desempenho no conforto térmico de fibras sintéticas e naturais utilizadas para a fabricação de não tecidos (WAZNA et al., 2018; HADDED et al., 2016; PAUL; DILLER, 2003; YACHMENEV; BERTONIERE; BLANCHARD, 2002). Além da avaliação da capacidade intrínseca de isolamento do material que constitui as fibras utilizadas na produção de não tecidos, parâmetros técnicos associados à influência do seu comprimento, diâmetro, densidade, porosidade e orientação das fibras no substrato fibroso sobre a condutividade térmica já foram estudados (WANG; YU; PAN, 2007; GIBSON; LEE; RENEKER, 2007; MOHAMMADI; BANKS-LEE; GHADIMI, 2003; FU; MAI, 2003)

Em linhas gerais, a maioria das fibras utilizadas para o processo de produção de não tecidos apresenta baixa condutividade térmica, o que pode ser uma característica importante quando a finalidade é a utilização das mesmas como isolante térmico (SINCLAIR, 2008). A fibra de poliéster (PES) é conhecida por ser um bom isolante térmico e apresenta valores baixos de condutividade térmica, na ordem de  $0,05 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (YANG; YAN; LAM, 2014). A PES é considerada uma das mais inovadoras e versáteis fibras das últimas duas décadas, e sua aplicação na área têxtil apresenta algumas vantagens, tais como a baixa densidade por área e flexibilidade (PATNAIK et al., 2015; GRISHANOV, 2011).

Destaca-se, também, que nos últimos anos a reciclagem tem sido um tema atraente considerando a sustentabilidade dos resíduos provenientes de diferentes aplicações de engenharia. Neste âmbito, as fibras de poliéster recicladas por métodos mecânicos e químicos a partir de garrafas plásticas podem ser reutilizadas para a produção de não tecidos, contribuindo para a diminuição da poluição ambiental, prevenção da redução do fornecimento de petróleo e diminuição do custo da matéria-prima dos não tecidos. Além disso, a produção de fibras de poliéster recicladas utiliza menos energia do que as fibras virgens (KUMAR; THILAGAVATHI; KARTHIKKA, 2020).

A literatura apresenta alguns estudos envolvendo o uso de fibras de poliéster recicladas para obtenção de não tecidos para isolamento térmico e/ou acústico. Esses não tecidos são geralmente obtidos pela combinação das fibras de poliéster recicladas com outros materiais de origem natural, como lã (PATNAIK et al., 2015), algodão (KUMAR;

THILAGAVATHI; KARTHIKKA, 2020; SAKTHIVEL et al., 2020) e kapok (JABBAR et al., 2020).

No entanto, até os dias atuais, a influência da substituição de uma fração de fibras virgens de poliéster por fibras recicladas na produção de não tecidos pela técnica de formação de cardagem a seco, bem como o seu desempenho térmico não foi evidenciada. Portanto, esse trabalho busca desenvolver não tecidos com desempenho térmico adequado para aplicações como isolamento térmico utilizando fibras de PES virgens e recicladas em diferentes proporções.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é o desenvolvimento de não tecido constituído de fibras de poliéster virgens e recicladas para a aplicação em isolamento térmico.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Produzir amostras de não tecido de poliéster utilizando a técnica de formação de cardagem a seco.
- b) Avaliar a influência da substituição de 20 % de fibra de poliéster convencional virgem por fibras de poliéster recicladas de diferentes títulos sobre as propriedades do não tecido.
- c) Determinar a proporção máxima de substituição das fibras virgens utilizadas em uma formulação padrão por fibra reciclada que viabilize a produção do não tecido e analisar seu impacto nas propriedades físicas e térmicas.
- d) Avaliar a influência da alteração da fibra virgem convencional por uma fibra térmica siliconada nas propriedades e no comportamento de queima do não tecido.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção são abordados aspectos teóricos relacionados aos conceitos de transferência de calor envolvidos no isolamento térmico, materiais utilizados como isolantes, à produção de nãotecido e ao potencial de isolamento térmico das fibras de poliéster.

### 2.1 ISOLAMENTO TÉRMICO

O crescente interesse pelo isolamento térmico em edificações pode ser relacionado com o objetivo da redução do consumo energético, o qual pode ser decorrente da necessidade de conforto térmico pelo homem. A busca pelo conforto térmico é algo bastante antigo, sendo elencado diretamente com um complexo de estado mental que depende de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos (TALEGHANI et al., 2013; MARINHO, 2013). Segundo a norma ISO 7730 de 2005 (ISO, 2005), conforto térmico é o estado de espírito que expressa a satisfação do indivíduo com o ambiente térmico, não sentindo muito frio e nem muito calor.

O desconforto térmico está associado diretamente à redução da produtividade e da concentração, fadiga, estresse e ansiedade (HALL, 2010). Inclusive, o conforto térmico no ambiente de trabalho é preconizado no Brasil pela normativa NR 17, onde a instituição deve adotar medidas de controle de temperatura (entre 18 e 25 °C em ambientes climatizados), da velocidade e umidade do ar. Portanto, além da procura por substratos que ofereçam conforto térmico relacionado ao vestuário, essa busca também está associada ao isolamento térmico do ambiente, a partir de materiais de construção que proporcionem esta característica (PAPADOPOULUS, 2005).

O conforto térmico nas edificações e seu consequente impacto no consumo energético vem sendo discutido com uma intensidade que a cada ano se torna maior (YUAN et al., 2022). Esse comportamento está associado ao fato do crescimento da utilização do condicionamento artificial, o que contribui com a emissão de gases de efeito estufa e gera maior necessidade de investimentos na infraestrutura do setor elétrico (ZHAI et al., 2022). Este efeito é agravado se considerados os resultados de estudos recentes que associam negativamente o ar-condicionado a uma espécie de vício despertado pela memória térmica de seus usuários. Assim, quanto mais uma pessoa é exposta ao condicionamento artificial, maior é o seu desejo de permanecer nestes espaços, e maior a sua intolerância às temperaturas mais elevadas (YAO et al., 2022).

Nesse sentido, a função principal de um isolante térmico é diminuir a taxa de transferência de calor entre um sistema e o meio, de modo que a energia possa ser conservada. No caso de edificações, o isolamento térmico pode ser definido como os materiais extras que são adicionados às paredes para mitigar a troca de energia de dentro para fora e vice-versa. Esses materiais devem possuir propriedades e espessura capazes de manter a temperatura dentro de um determinado intervalo (TORREIRA, 1980).

## 2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SISTEMAS DE ISOLAMENTO

Calor pode ser definido como uma forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro em decorrência da diferença de temperatura. A transferência de calor, portanto, ocorrerá sempre que houver um desequilíbrio de temperatura no sistema, gerando um fluxo de calor do meio de maior para o meio de menor temperatura, que será cessado quando os dois meios atingirem o equilíbrio. Nesse sentido, o calor pode ser transferido por diferentes formas associadas com a condução, a convecção e a radiação. Todas essas formas de transferência de calor exigem diferença de temperatura (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

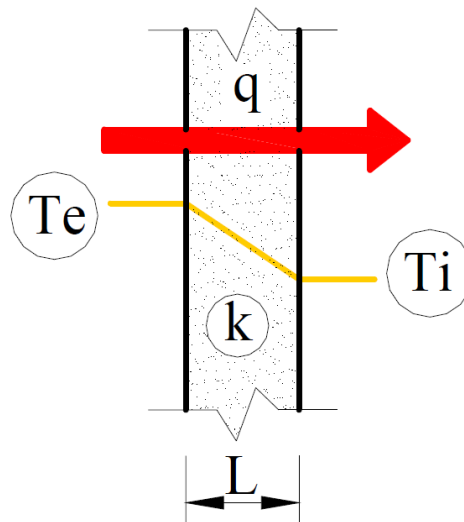
Os isolamentos podem ser categorizados em duas classes principais por sua função na manipulação da transferência de calor: isolamento de massa e isolamento refletivo. Isolamentos de massa são aqueles que podem retardar o fluxo de calor por condução, enquanto isolamentos refletivos são aqueles que reduzem a quantidade de transferência de calor por radiação. Considerados o tipo de isolamento térmico mais utilizado, o isolamento de massa diminui a taxa de fluxo de calor por condução no caso em que praticamente não ocorre convecção e radiação por transferência de calor (ADITYA et al., 2017). Os não tecidos para isolamento térmico em edificações podem ser considerados isolamentos de massa. Portanto, nos próximos subitens serão apresentados aspectos relacionados à transferência de calor por condução.

### 2.2.1 Condução

A condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de um determinado material para as partículas adjacentes menos energéticas. Esse fenômeno pode ocorrer em todos os tipos de materiais sólidos ou fluidos estagnados (líquidos ou gases) (KLEIN; NELLIS, 2009). Na Figura 1 apresenta-se um esquema do mecanismo de

transferência de calor por condução. Observa-se que a intensidade de fluxo de calor ( $q''$ ) está vinculada com as diferenças de temperatura externa ( $T_e$ ) e interna ( $T_i$ ), espessura do material ( $L$ ) e a condutividade térmica do material ( $k$ ).

Figura 1 – Mecanismo de transferência de calor por condução



Fonte: Adaptado de Kreith e Manglik (2016)

No caso dos materiais líquidos e gasosos, o principal mecanismo associado à condução são as colisões e as difusões das moléculas em seus movimentos aleatórios. Nos sólidos, a condução acontece devido à combinação das vibrações das moléculas em rede, e a energia é transportada por elétrons livres (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A taxa de condução de calor está diretamente associada com a geometria, espessura, a composição do material, e a diferença de temperatura em que o meio está submetido, sendo descrita em termos unidimensionais pela Lei de Fourier (Equação 1).

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dX} \quad (1)$$

Onde:

$q$ : taxa de transferência de calor (W);

$A$ : área da seção transversal, perpendicular à direção do fluxo de calor ( $m^2$ );

$k$ : condutividade térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ );

$dT/dX$ : gradiente de temperatura na seção ( $K \cdot m^{-1}$ ).

A Lei de Fourier da condução térmica foi expressa pela primeira vez em 1822 pelo físico e matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Por meio dessa expressão, conclui-se que a taxa de condução de calor ( $q$ ) em uma dada direção é proporcional à diferença de temperatura na mesma direção, sendo que o gradiente ( $dT/dx$ ) torna-se negativo quando a temperatura decresce com o aumento de  $x$ . A taxa também é diretamente proporcional à área e à condutividade térmica do material, mas inversamente proporcional à espessura da camada de material.

Devido a isso, a eficácia dos isolamentos de massa depende muito da espessura do material de isolamento. Aumentar a espessura aumenta proporcionalmente o desempenho térmico do isolamento de massa (ADITYA et al., 2017). A determinação tanto do material de isolamento quanto a espessura econômica da camada do isolamento tem sido objeto de muitos estudos. O conceito de espessura econômica do isolamento térmico considera o custo inicial do sistema de isolamento mais o valor contínuo da economia de energia ao longo da vida útil esperada do isolamento (KAYNAKLI, 2012).

### 2.2.2 Resistencia térmica

A resistência térmica é um conceito utilizado para designar uma resistência à transferência de calor de um sistema. Nesse sentido, a resistência térmica por condução possui uma relação inversamente proporcional à condutividade térmica do material que constitui o sistema. A resistência térmica é uma propriedade de calor e a medição de uma diferença de temperatura pela qual um objeto ou material resiste ao fluxo de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). A resistência térmica para condução de calor em uma parede plana é definida pela Equação 2:

$$R_T = \frac{L}{KA} \quad (2)$$

Onde:

$R_T$ : resistência térmica ( $K W^{-1}$ )

$K$ : condutividade do material ( $W m^{-1} K^{-1}$ );

$L$ : espessura do plano ou parede (m);

$A$ : área superficial do plano ( $m^2$ ).

## 2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS COMO ISOLANTES TÉRMICOS

De forma geral, para um material ser considerado um bom isolante térmico, deve apresentar distintas características, tais como, baixa condutividade térmica, boa resistência mecânica, baixa massa específica, baixa difusividade térmica; elevado calor específico; resistência à combustão, baixo coeficiente de expansão térmica; estabilidade química e física; resistência específica ao ambiente de utilização; facilidade de aplicação e ausência de odor e baixo custo (TORREIRA, 1980).

No entanto, a literatura reporta que é praticamente impossível associar todas as características indicadas em um único tipo de material empregado como isolante térmico (PAPADOPOULUS, 2005; TORREIRA, 1980). Assim, dentre as características citadas, a condutividade térmica tem sido a propriedade mais avaliada na escolha de um material a ser empregado como isolante térmico (TORREIRA, 1980).

### 2.3.1 Condutividade térmica

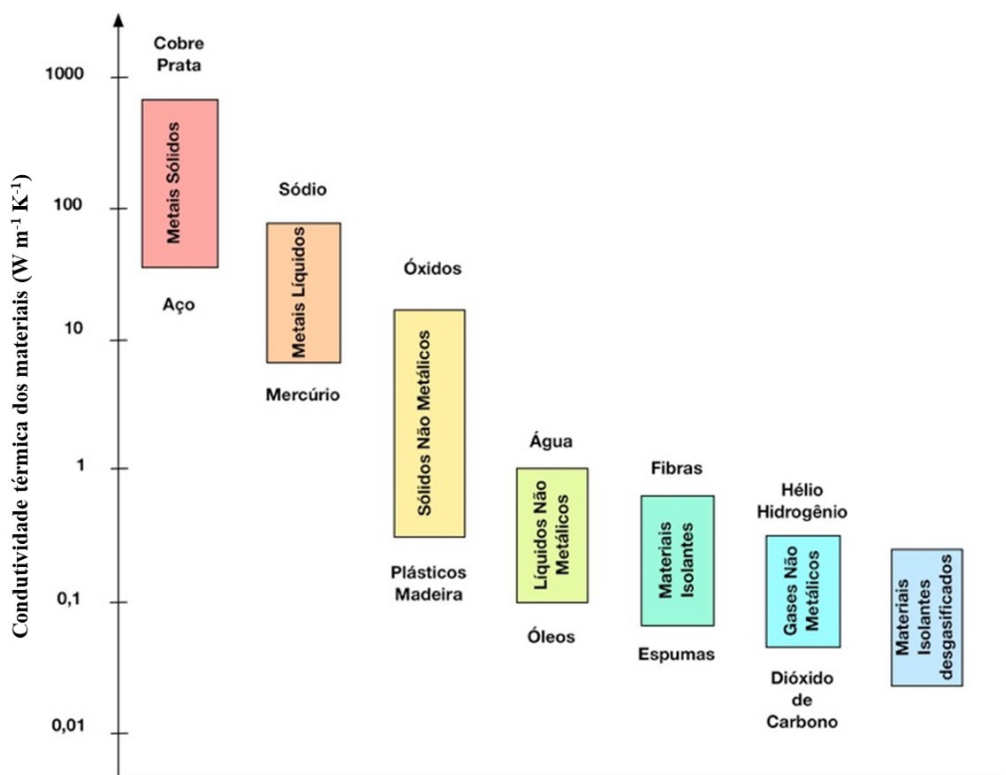
A condutividade térmica é uma das principais características dentre todas as propriedades físicas de um material isolante e está associada com a capacidade de um material conduzir calor (PAPADOPOULUS, 2005). Em aplicações em que o objetivo é o isolamento térmico, a transferência de calor entre dois meios deve ser minimizada e para isso um material com baixo valor de condutividade térmica deve ser selecionado. Contudo, quando é necessário o aumento da taxa da transferência de calor, um material com elevado valor de condutividade térmica é empregado. É esta propriedade que demarca o grau da temperatura de trabalho do material, tornando-se importante na transferência de calor transiente (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A condutividade térmica é dependente da estrutura física do material utilizado. A condutividade térmica de um material sólido é comumente maior do que a de um material líquido, que conseqüentemente é maior que de um gás (INCROPERA et al., 2008). A maior condutividade térmica de um material sólido está associada ao menor espaçamento intermolecular e à limitação do movimento das moléculas quando comparado ao material líquido (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Além disso, indiferente do material utilizado, quando um gradiente de temperatura é imposto, pode ocorrer escoamento natural do fluido devido às forças de empuxo originadas pelas diferenças de massa específica.



Quando se trata de materiais sólidos a condução de calor ocorre por dois efeitos associados com: (i) as ondas de vibração de rede motivadas pelos movimentos vibracionais das moléculas arranjadas em posições relativamente fixas, de forma periódica, e (ii) a energia transportada por meio do movimento livre dos elétrons presentes nos sólidos. Nesse sentido, a condutividade térmica dos sólidos é resultante da soma do componente de rede e do componente eletrônico (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Na Figura 2 são apresentadas as faixas de condutividade térmica de vários materiais em temperatura ambiente.

Figura 2 – Faixa de condutividade térmica de diferentes materiais em temperatura ambiente



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar (2012)

De acordo com a norma DIN 4108 (Isolamento térmico e economia de energia em edifícios), os materiais com valor de condutividade térmica inferior a  $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  podem ser classificados como materiais isolantes térmicos. A condutividade térmica dos polímeros, como o PES, é geralmente muito baixa, na ordem de  $0,01$  a  $0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , e depende muito da sua morfologia. Uma estrutura polimérica típica consiste em domínios cristalinos, onde as cadeias poliméricas são alinhadas periodicamente, e domínios amorfos, onde as cadeias poliméricas são emaranhadas aleatoriamente. Quando os domínios amorfos são dominantes, os modos vibracionais no polímero tendem a ser localizados, resultando em uma baixa

condutividade térmica. Já quando as cadeias possuem elevado alinhamento, a condutividade térmica tende a aumentar. Além da morfologia da cadeia, a sua estrutura também desempenha um papel importante na determinação da condutividade térmica. A condutividade térmica de uma cadeia polimérica diminui quando as cadeias laterais são introduzidas e, geralmente, uma cadeia lateral mais pesada leva a uma menor condutividade térmica (HUANG; QIAN; YANG, 2018).

A um nível microscópico, a condutividade térmica depende de numerosos fatores como tamanho da célula, diâmetro e disposição das fibras ou partículas e materiais de ligação. No nível macroscópico, a condutividade térmica aparente depende, em grande parte, de fatores como temperatura média, teor de umidade, densidade e grau de envelhecimento dos materiais envolvidos (AHN; PÁSZTORI, 2021). Um fator determinante que influencia diretamente na condutividade térmica dos diferentes materiais é a temperatura. No entanto, a variação da condutividade térmica ao longo de certos intervalos de temperatura pode ser insignificante para alguns materiais e totalmente dependente para outros. Especialmente no caso dos sólidos, a condutividade térmica exibe um aumento drástico para temperaturas próximas a zero, tornando-os materiais supercondutores (VARKIYANI et al., 2011). A dependência da condutividade térmica sobre a temperatura resulta em uma complexidade considerável na análise da condução. Diante disso, tem-se como prática avaliar a condutividade térmica na temperatura média e tratá-la como constante em cálculos (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

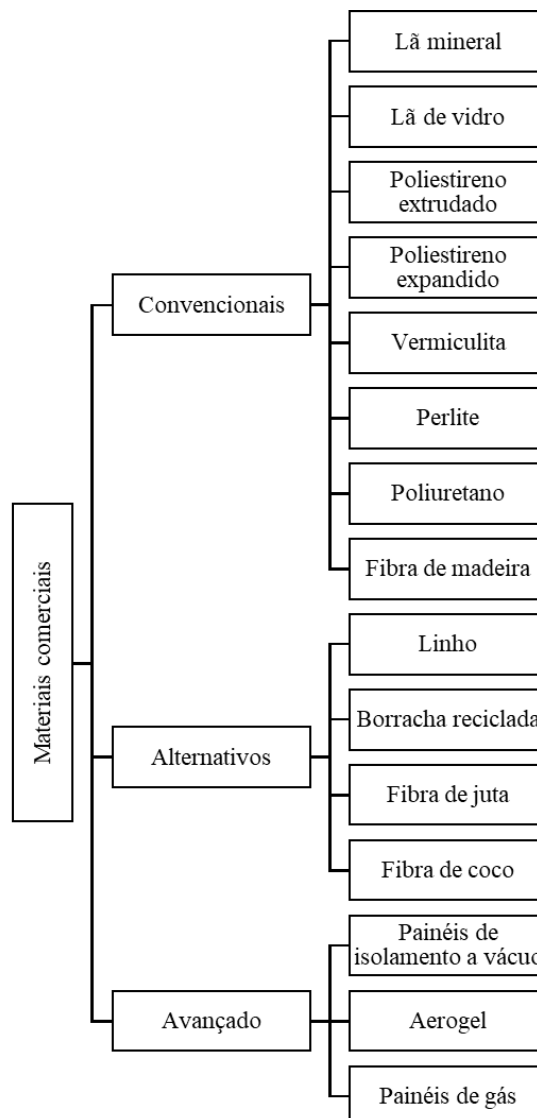
A umidade excessiva em decorrência de fatores como infiltrações pode representar problemas que vão desde a deterioração do material até a redução da resistência térmica do isolamento. Como a condutividade térmica da água é cerca de 20 vezes maior que a do ar estacionário, a absorção de água está sempre ligada a um aumento na condutividade térmica (AHN; PÁSZTORI, 2021). Em relação à densidade, a condutividade térmica tende a reduzir com o aumento desta propriedade. De acordo com Ahn e Pásztori (2021), a presença de bolhas grandes proporcionam uma transferência de calor mais intensa através do material. À medida que a densidade aumenta, as bolhas de ar serão menores e a estrutura do material se tornará mais complexa. Na bolha menor a transferência de calor é menor e, adicionalmente, o sistema tem maior resistência térmica e a condutividade das partes sólidas será mais dominante. Esses três fenômenos (tamanho da bolha, complexidade da estrutura, quantidade de conteúdo sólido) resultam em uma condutividade térmica efetiva que pode atingir um valor mínimo.

## 2.4 MATERIAIS EMPREGADOS COMO ISOLANTES TÉRMICOS

Devido à ampla aplicação na engenharia, os isolantes térmicos são selecionados a partir de fatores econômicos, de segurança e funcionais.

Conforme descrito anteriormente, quando se trata de isolantes térmicos utilizados na construção civil, os materiais são classificados como mineral, sintético, vegetal e animal (SILVA, 1996). Na Figura 3 apresentam-se os principais materiais comerciais utilizados como isolantes térmicos no mundo.

Figura 3 - Principais materiais comerciais utilizados como isolantes térmicos



Fonte: Adaptado de Wazna et al. (2017)

Os materiais de origem mineral são concebidos com base em matérias-primas naturais e encontrados de maneira abundante (como areia, rocha vulcânica). Estes materiais possuem uma excelente resistência ao fogo e apresentam-se, geralmente, sob a forma de painéis rígidos ou semirrígidos. Os materiais sintéticos como o poliestireno e o poliuretano são produzidos a partir de hidrocarbonetos, os quais têm origem em matérias-primas não renováveis. Já os materiais de natureza vegetal e animal são materiais provenientes de fibras vegetais (como fibra a partir de madeira e de algodão, cortiça, palha, celulose e fibra de coco) e animais (como lã de ovelha e penas de pato). A grande vantagem da utilização das fibras de origem natural está relacionada ao baixo impacto ambiental (PAPADOPOULUS, 2005).

Em nível mundial, os materiais mais utilizados como elementos térmicos na construção civil são materiais desenvolvidos a partir de fibras naturais, espumas provenientes de plásticos e lã mineral. Em relação aos produtos à base de lã mineral, estes representam entre 50-55%, enquanto as espumas plásticas entre 40-45 % da produção total (BOZSAKY, 2010; HEGYI et al., 2022). Segundo Papadopoulus (2005), o mercado de materiais de isolamento térmico é dominado por aqueles de origem artificial. No entanto, atualmente no Brasil, não se tem disponível maiores indicações sobre os tipos de materiais, bem como as normativas para a sua utilização. As indicações disponíveis estão vinculadas apenas a NBR 11752 de 2016 (ABNT, 2016), que se refere a materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e refrigeração industrial.

No Quadro 1 são apresentadas as faixas de valores de densidade e de condutividade térmica observados para alguns materiais comumente utilizados como isolantes térmicos.

Quadro 1 – Densidade e condutividade térmica de materiais isolantes comuns

<b>Material</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade térmica (W·m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)</b>
Lã de vidro	13–100	0,03–0,045
Lã de rocha	30–180	0,033–0,045
Silicato de cálcio	115–300	0,045–0,065
Vermiculita	70–160	0,046–0,07
Fibra de vidro	24–112	0,033–0,04
Espuma de polietileno	40–160	0,022–0,04
Poliestireno expandido	15–35	0,035–0,04
Aerogel	60–80	0,013–0,014

Fonte: Adaptado de AHN; PÁSZTORY (2021)

## 2.5 NÃOTECIDOS

A utilização de nãotecidos está em constante crescimento. Em nível mundial, no ano de 2020, a indústria de produção de nãotecidos investiu mais de R\$ 4,5 bilhões nesse segmento. Nesse mesmo ano, esse setor gerou mais de 1,36 milhão de empregos diretos, produziu 1,91 milhão de toneladas de nãotecidos, exportou em torno de 1,06 bilhões de toneladas e importou em média 5,2 bilhões de toneladas (ABIT, 2022).

O termo nãotecido advém do nome em inglês *nonwoven*, e foi criado para designar um amplo grupo de têxteis produzidos por métodos não convencionais, como tecelagem e malharia, mas não o excluí da categoria de têxteis (COSTA, 2003). Segundo a NBR 13370 de 2017 (ABNT, 2017a), nãotecido é conhecido como uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados em determinada direção ou ao acaso, podendo a estrutura ser consolidada por processo mecânico (fricção), químico (adesão) ou térmico (coesão), ou ainda pela combinação de dois ou dos três processos supracitados (ABNT, 2017).

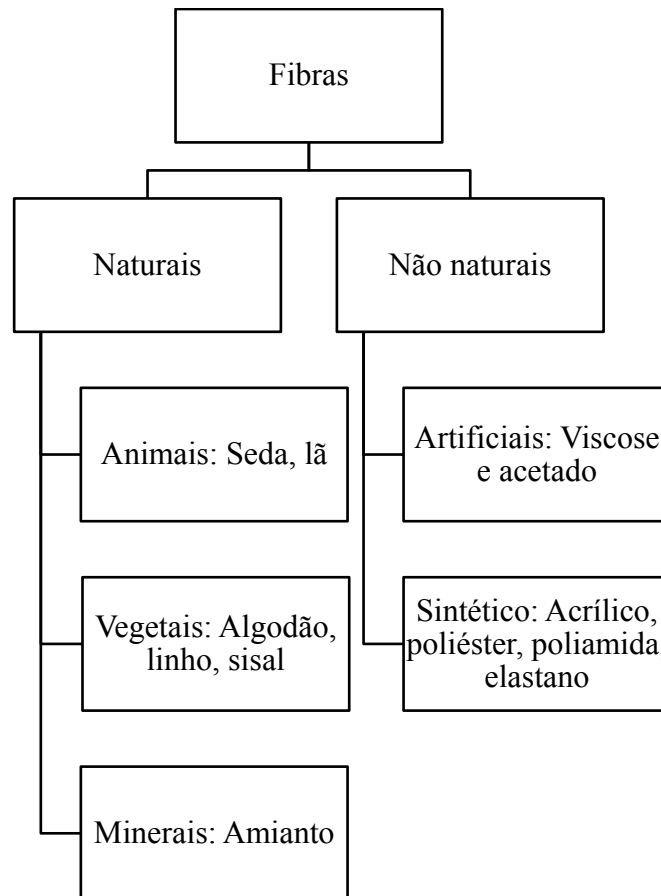
A estrutura do nãotecido é, portanto, diferente do tecido plano, que conforme a NBR 12546/2017 (ABNT, 2017) constitui-se de uma estrutura produzida pelo cruzamento formado por dois elementos, sendo um conjunto de fios dispostos na direção longitudinal, chamado de urdume e outro conjunto de fios dispostos na transversal, chamado de trama, formando ângulo aproximadamente de 90°. Já o tecido de malha, de acordo com NBR 13462/1995 (ABNT, 1995), é formado a partir de um ou mais fios que fazem evolução em diversas agulhas, formando um curso de laçadas sucessivas que se entrelaçam com as laçadas dos cursos seguintes.

### 2.5.1 Fibras utilizadas para a produção de nãotecidos

Fibra têxtil é um termo genérico para vários tipos de materiais, de origem natural ou não, que formam os elementos básicos para fins têxteis. Caracteriza-se por apresentar um comprimento pelo menos 100 vezes superior ao seu diâmetro ou espessura (ASTM, 2013). As fibras têxteis são oriundas de várias fontes, e esse critério é utilizado para sua classificação, sendo conhecidas como naturais, quando extraídas da natureza, ou manufaturadas, também conhecidas como não naturais (SENAI MIX DESIGN, 2015). Atualmente, existem diferentes

maneiras de classificar as fibras. Alguns autores classificam como fibras naturais (vegetal e animal), sintética (derivadas do petróleo) e artificiais (celulose regeneradas por tratamentos químicos). Já o manual técnico Têxtil e Vestuário, exclusivo sobre fibras têxteis (SENAI MIX DESIGN, 2015) classifica as fibras apenas em naturais (mineral, vegetal e animal) e químicas (sintéticas e artificiais). Na Figura 4 ilustra-se uma das classificações das fibras têxteis amplamente utilizada na indústria têxtil, já com alguns exemplos.

Figura 4 - Classificação das fibras têxteis

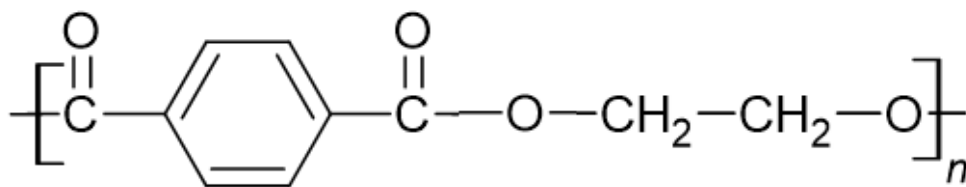


Fonte: Adaptado de CUMBI (2013)

As fibras naturais podem ser de origem animal, como a seda e a lã, vegetais como o algodão, coco, curauá, sisal, rami, e de origem mineral, como a crisotila e crocidotila, entre outras. Enquanto as fibras não naturais ou manufaturadas podem ser subclassificadas em artificiais, produzidas a partir da celulose, como o raiom, a viscose e o acetato, ou sintéticas, de origem petroquímica (acrílico, elastano, elastodieno, modacrílico, poliamida, policarbamida, policloreto de venila, policloreto de vinilideno, policlorofluoretileno, poliéster, poliestireno, politetrafluoretileno, poliuretano, vinal e vinilal) (CUMBI, 2013).

A fibra de poliéster (PES) é amplamente empregada para a produção de nãotecidos (YANG et al., 2020). Essa fibra representa mais de 50% da demanda total de fibras químicas, podendo ser utilizada pura ou em mistura com algodão, viscose, poliamida, linho, entre outras, em proporções variadas (ABINT, 2013). As primeiras fibras de PES surgiram em 1941 e são formadas a partir de ácidos aromáticos sintéticos e glicóis. A seção transversal da fibra de PES pode ser modificada para criar tecidos com inúmeras características especiais, alterando seu brilho, toque e caimento. A grande vantagem dessa fibra é a sua elevada estabilidade dimensional quando sofre um processo de termofixação. Além disso, o PES, quando úmido não altera a sua forma e, portanto, não encolhe e pode estabilizar tecidos misturados com outras fibras (RUSSEL, 2007). Na Figura 5 ilustra-se a estrutura molecular do PES.

Figura 5 – Estrutura molecular do poliéster



Fonte: Adaptado de INTINI; KÜHTZ (2011)

Classificadas em fibras químicas, foram desenvolvidas com o objetivo de apresentar um desempenho superior que as fibras naturais (INTINI; KÜHTZ, 2011). Suas principais características estão relacionadas com boa elasticidade e estabilidade dimensional, sendo resistentes à ruptura e ao desgaste. Além disso, possuem aparência brilhante com aspecto vítreo. Suas propriedades físicas em estado úmido são iguais à em estado seco. Apresenta elevada resistência à luz e condições climáticas, bem como a insetos e à formação de bolor (CUMBI, 2013).

A utilização de fibras de PES reciclada está em ascensão por questões de sustentabilidade. He et al. (2014) compararam as propriedades das fibras virgens e recicladas de PES, em termos de morfologia, cristalinidade e propriedades mecânicas. Foi observado que as fibras possuem morfologias semelhantes, mas as fibras recicladas não são tão uniformes, o que poderia ser prejudicial para processos posteriores de fiação e tecelagem. As fibras recicladas apresentaram maior resistência à tração e cristalinidade, o que os autores ressaltam

que pode ser devido à presença residual de polímeros de elevado desempenho no material reciclado.

Nãotecidos de fibras de poliéster apresentam potencial para aplicação em isolamento térmico e acústico. Rosa (2021), por exemplo, estudou a influência das camadas para o isolamento acústico, produzindo amostras com 24, 40 e 58 camadas com espessuras 50mm e gramatura  $1500\text{g/m}^{-2}$ , evidenciou que quanto menor a permeabilidade ao ar menor foi a absorção acústica

O tipo de nãotecido produzido está diretamente relacionado à fibra utilizada, de acordo com o produto final requerido, bem como com o tipo do processo de fabricação empregado, ou seja, sua formação e consolidação. Além disso, as principais características de um nãotecido são a gramatura, a espessura, o tipo da formação e consolidação da manta, (RUSSEL, 2007). Especialmente no Brasil, independente da fibra utilizada ou processo de fabricação, quanto à gramatura, os nãotecidos classificam-se em: (i) leve (menor que  $25\text{ g m}^{-2}$ ); (ii) médio (entre  $26$  a  $70\text{ g m}^{-2}$ ); (iii) pesado (entre  $71$  a  $150\text{ g m}^{-2}$ ); (iv) muito pesado (acima de  $150\text{ g m}^{-2}$ ). De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecções, a gramatura dos nãotecidos variam de  $7\text{g m}^{-2}$  até aproximadamente  $4000\text{ g m}^{-2}$  (ABIT, 2013).

### **2.5.2 Processo de fabricação de nãotecidos**

Conforme abordado anteriormente, a classificação do nãotecido produzido está vinculada ao tipo de fibras utilizadas, à técnica de formação e consolidação e à gramatura do nãotecido produzido (ABIT, 2013). Indiferente do tipo de nãotecido fabricado, existem quatro etapas primárias atreladas a sua produção. Essas etapas incluem a seleção e o preparo da fibra, a formação, a consolidação do véu ou manta e o acabamento final (RUSSEL, 2007). No Quadro 2 apresenta-se, de forma resumida, as diferentes etapas de fabricação de um nãotecido.

No processo de formação via seca, a fabricação do nãotecido pode ser conduzida via cardagem ou fluxo de ar. No sistema cardado ocorre a paralelização das fibras na direção da máquina para a produção do véu. Enquanto que por meio do fluxo de ar, a fibra é suspensa e posteriormente depositada de maneira aleatória, conferindo propriedades isotrópicas ao véu formado. Já no processo via úmido é adicionada água nas fibras, formando uma massa fibrosa, sendo a seguir parte do líquido removido e o restante utilizado para criar ligações de



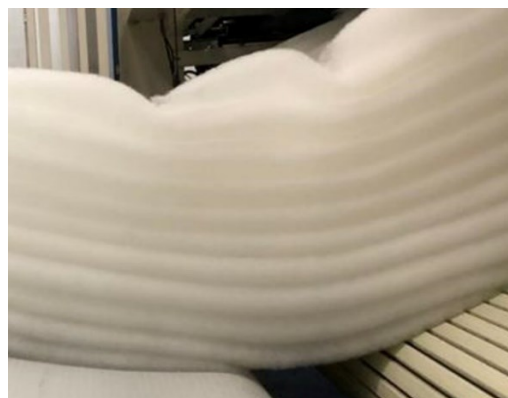
hidrogênio com a pasta celulósica, ou para que o ligante aplicado seja polimerizado, ocorrendo assim a consolidação. O processo de fusão ou fiação direta remete-se a recepção das fibras após essas serem extrudadas por fieiras (ABIT, 2013). Na Figura 6 está apresentada uma imagem da formação de manta de não tecido composto por vários véus.

Quadro 2– Etapas de fabricação de um não tecido

<b>Etapas de fabricação do não tecido</b>	<b>Descrição</b>
Seleção e preparação da fibra	Escolha adequada da fibra em função do produto que se pertente produzir, do custo e benefício e da necessidade do consumidor final
Formação da manta ou véu	Ocorre a disposição das fibras para formar a manta constituída por um ou mais véus. A formação pode ocorrer via seca, via úmida ou fundida
Consolidação do véu ou manta	Nesse processo ocorre a união das fibras. A consolidação pode ser mecânica, química ou térmica
Acabamento final	Estão associadas a esse processo o refilamento, corte, a dublagem, a impregnação, a adesivagem, o tingimento, a estamparia, a chamuscagem, a laminação, entre outras operações

Fonte: Adaptado de RUSSEL (2007)

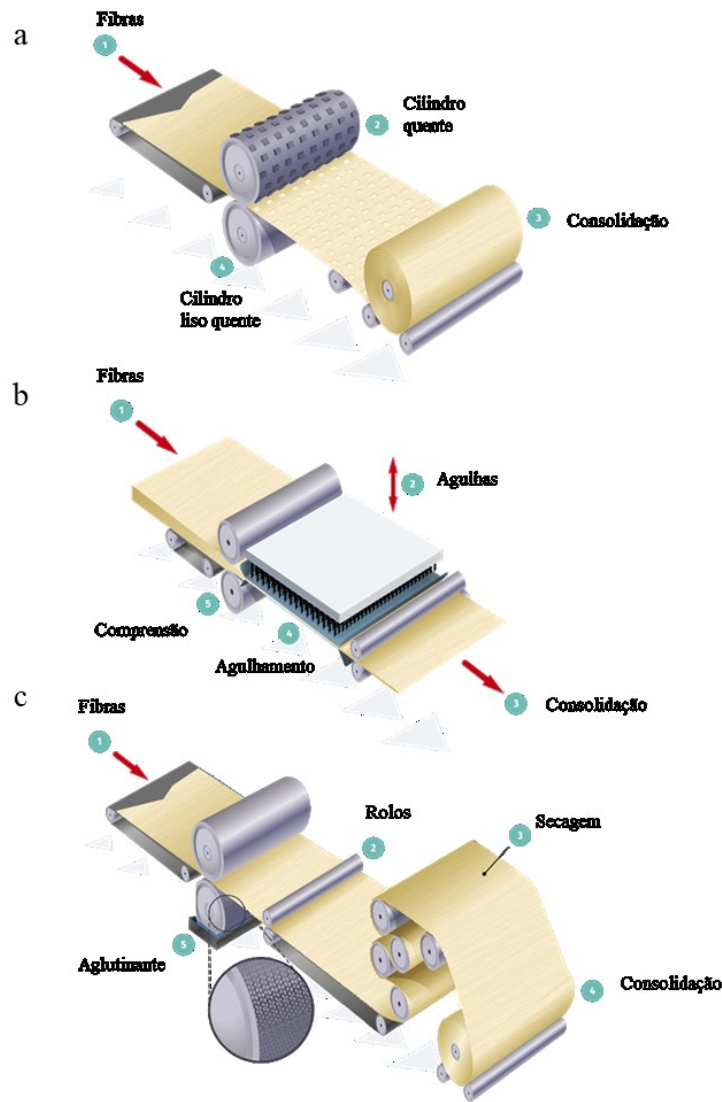
Figura 6 - Formação de manta de não tecido composto por vários véus



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a formação do véu ou da manta ocorre a etapa de consolidação. Essa etapa pode ser conduzida baseada em três métodos distintos responsáveis pelas propriedades do produto final: (i) mecânico: por intermédio da fricção das fibras e de agulhas; por meio de jatos d'água de elevada pressão, ou, ainda, pela técnica de costura, com ou sem linha; (ii) químico: a união das fibras ocorre pela adição de agentes ligantes, ocorrendo a adesão; (iii) térmicos: a consolidação das fibras ocorre por meio da elevação da temperatura proporcionando sua coesão (CUMBI, 2013). Na Figura 7 é possível visualizar as diferentes técnicas de consolidação.

Figura 7 - Tipos de consolidação de fibras: a) consolidação térmica por cilindros aquecidos; b) consolidação mecânica; c) consolidação química



Fonte: Adaptado de EDANA (2022)

Posteriormente as etapas (seleção e preparação das fibras, formação e consolidação do véu e acabamento final) o não tecido está pronto para o uso e permanece disposto em grandes rolos. Segundo Cumbi (2013), muitas são as modificações para melhorar o desempenho do não tecido manufaturado, mas considera-se que ainda existem muitas possibilidades a serem exploradas em relação à estética, tais como: a funcionalização dos não tecido, para torná-los hidrofóbicos ou hidrofílicos, repelentes a insetos, entre outros.

## 2.6 UTILIZAÇÃO DE NÃO TECIDOS COMO ISOLANTES TÉRMICOS

No caso das fibras utilizadas na fabricação de não tecidos, a transferência de calor pode ocorrer por convecção livre e forçada, condução através das fibras sólidas e condução através do ar nos espaços entre as fibras e radiação (VARKIYANI et al., 2011). No entanto, de acordo com Yang et al. (2020), a condução é o mecanismo dominante na maioria das situações envolvendo transferência de calor em um material fibroso não tecido. A radiação tende a ser desconsiderada quando a diferença de temperatura é inferior a 500 K (226 °C). Já a convecção pode ser também desconsiderada devido ao atrito causado pelas fibras constituintes e pelos poros suficientemente pequenos que impedem a convecção natural.

A utilização de não tecidos como um material que possui capacidade de isolamento térmico já vem sendo mostrada há muitas décadas (MOHAMMADI; BANKS-LEE; GHADIMI, 2003). Diferentes estudos elucidaram o potencial térmico das fibras, tanto sintéticas quanto naturais (CERKEZ; KOCER; BROUGHTON, 2017). Além do tipo de fibra utilizada para a produção de não tecidos, parâmetros relacionados com a condutividade térmica dos mesmos foram mostrados por alguns estudos (WASNA et al., 2019; DISSANAYAKE et al., 2018). No entanto, esses parâmetros foram estudados baseados apenas em simulação numérica (WANG; YU; PAN, 2007; CERKEZ; KOCER; BROUGHTON, 2017). No Quadro 3, sumariza-se as principais pesquisas realizadas para avaliar a capacidade de isolamento térmico de não tecidos.

Quadro 3– Pesquisas na temática de isolamento térmico utilizando não tecidos

<b>Autor</b>	<b>Objetivo da pesquisa</b>	<b>Fibra utilizada</b>
Yachmenev, Bertoniere e Blanchard (2002); Paul e Diller, (2003)	Avaliar o tipo de fibra utilizada para a produção de não tecido sobre a capacidade de transferência de calor	Fibras naturais e poliéster
Mohammadi, Banks-Lee e Ghadimi (2003)	Avaliar o efeito da densidade das fibras sobre a condutividade térmica	Fibras naturais
Fu e Mai (2003)	Avaliar o efeito da orientação das fibras na transferência de calor	Poliéster
Wang et al. (2007)	Avaliar a influência do comprimento da fibra na condutividade térmica	Linho
Gibson et al. (2007)	Avaliar a influência do diâmetro das fibras na condutividade térmica	Poliéster
Du, Fan e Wu (2008)	Avaliar a influência da porosidade dos não tecidos sobre a condutividade térmica	Poliéster
Wasna et al. (2019)	Avaliar o desempenho como isolante térmico de diferentes amostras de não tecidos produzidos a partir de fibras recicladas	Fibras recicladas oriundas de resíduos de acrílico, lã lavada e de carpete.
Jabbar et al. (2020)	Avaliar a resistência térmica e a permeabilidade ao ar de não tecidos constituídos de fibras de PES reciclada e fibras de kapok em diferentes proporções (20, 40 e 60%)	Poliéster e kapok

Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando um algoritmo, Wang et al. (2007) mostraram que a condutividade térmica das fibras se eleva com o aumento do comprimento da fibra e se aproxima de um valor estável quando o substrato fibroso tende a ser infinitamente longo. Além disso, esse estudo mostrou que a condutividade térmica efetiva é linear com o aumento da porosidade do material. Em outro estudo, Gibson et al. (2007) avaliaram a influência do diâmetro das fibras na condutividade térmica utilizadas para a produção de não tecidos, e mostraram que à medida que as fibras se tornam mais finas a condutividade térmica aumenta. Os autores mostraram ainda que o efeito do diâmetro da fibra no isolamento térmico é mais pronunciado em densidades das fibras mais baixas.

O efeito da densidade sobre a condutividade térmica de não tecidos foi estudada por Mohammadi, Banks-Lee e Ghadimi (2003). Os resultados mostraram que o aumento da

densidade das fibras diminui o caminho livre e aumenta a tortuosidade, diminuindo a taxa de transferência de calor. Estudos semelhantes foram conduzidos por Du, Fan e Wu (2008). Segundo os autores, existe uma porosidade ótima para materiais de isolamento fibrosos e esse valor ótimo é muito dependente da emissividade (emissão de radiação) da fibra e do diâmetro da fibra. Fu e Mai (2003), estudaram a orientação das fibras em relação a transferência de calor. Os resultados mostraram que quanto maior a orientação das fibras, maior a transferência de calor.

Em relação ao tipo de fibra, várias fibras naturais e sintéticas foram utilizadas para produzir nãotecidos para ser empregado como isolante térmico para naves espaciais (PAUL; DILLER, 2003) e isolamento automotivo (YACHMENEV; BERTONIERE; BLANCHARD, 2002). Ferreira e Marinho (2004) utilizaram um nãotecido produzido a partir de fibra de coco para ser empregado como isolante térmico de cobertura de um edifício. Os resultados atestaram a viabilidade da aplicação do nãotecido. Os autores concluíram que a adição de fibras vegetais contribuiu significativamente para melhorar as propriedades dos isolamentos térmicos. Jabbar et al. (2020) avaliaram a resistência térmica e a permeabilidade ao ar de nãotecidos constituídos de fibras de PES reciclada e fibras de kapok em diferentes proporções (20, 40 e 60 %). A resistência térmica diminuiu significativamente com o aumento da proporção de fibra de kapok. Uma interação significativa entre a proporção de fibra natural e a densidade de área foi observada para a permeabilidade ao ar.

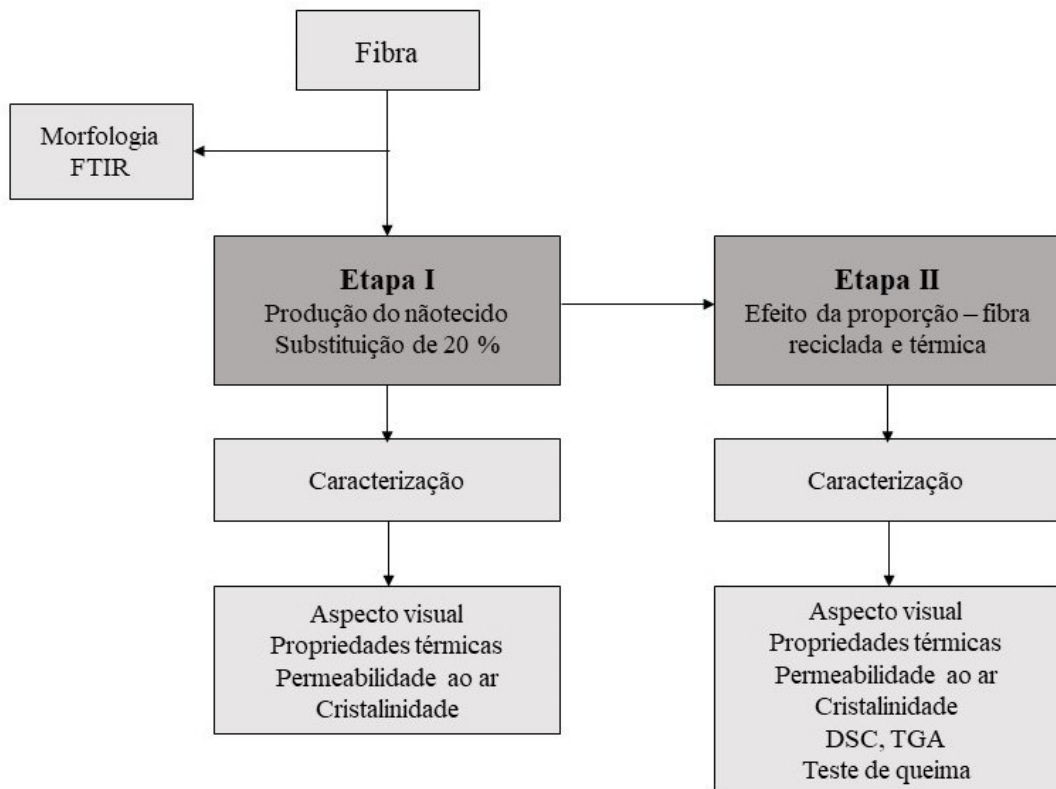
Como identificado no Quadro 3, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de elucidar fatores que podem maximizar o desempenho de nãotecidos quanto a sua efetividade na transferência de calor. No entanto, trabalhos relacionados a identificar a influência da proporção de fibras recicladas, bem como seu título, na transferência de calor não foram reportados até o momento.

### 3 METODOLOGIA

Neste item descrevem-se os materiais e as metodologias empregadas para a obtenção dos nãotecidos e sua caracterização em termos de propriedades térmicas, cristalinidade, e comportamento térmico.

A pesquisa foi desenvolvida em duas diferentes etapas relacionadas a produção de amostras de nãotecido contendo 20 % de fibra reciclada de diferentes títulos, a avaliação do efeito de crescentes proporções de fibra reciclada e sua comparação com uma fibra térmica siliconada nas propriedades do nãotecido. Na Figura 8 apresenta-se, resumidamente, um fluxograma com as principais etapas que foram conduzidas na pesquisa.

Figura 8 - Representação esquemática das etapas da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 3.1 MATERIAIS

Para a formação dos nãotecidos foram utilizados 7 diferentes tipos de fibras, sendo 4 fibras de poliéster virgem (oriundas da China), 2 fibras recicladas de garrafas PET (polietileno

tereftalato) (provenientes do Brasil) e uma fibra virgem à base de poliéster e silicone (China). Características dessas fibras, como estrutura, título e comprimento estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das fibras utilizadas para a produção dos não tecidos

<b>Denominação da fibra</b>	<b>Tipo</b>	<b>Título (denier)</b>	<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Origem</b>	<b>Cor</b>
BI-4,4	Bicomponente	4,4	51	virgem	branca
HR-11	Oca regular	11	64	virgem	branca
HC-8	Oca conjugada	8	64	virgem	branca
HC-15	Oca conjugada	15	64	virgem	semiopaca
SR-1,4	Sólida regular	1,4	64	reciclada	semiopaca
SR-3,3	Sólida regular	3,3	64	reciclada	semiopaca
HCS-3,3	Oca conjugada	3,3	64	virgem	semiopaca

Fonte: Elaborado pelo autor

A fibra bicomponente (Bi-4,4) caracteriza-se por apresentar duas camadas, sendo uma camada interna com ponto de fusão a 240 °C, e uma camada externa que possui o ponto de fusão de 110 °C. Na seção de Resultados e Discussão, as características dessa fibra serão mais detalhadas.

Foram utilizadas também fibras ocas regulares (HR) e fibras ocas conjugadas (HC), cuja diferença está relacionada com a crimpagem, definida como o número de ondulações da fibra por unidade de comprimento, nesse caso, polegada. Desta forma, as fibras regulares possuem menor crimpagem, sendo mais lineares, enquanto fibras conjugadas apresentam maior crimpagem. As fibras sólidas avaliadas (SR) possuem estrutura regular e são de origem reciclada.

Foi também avaliada a fibra virgem HCS - 3,3, produzida com dois tipos de polímeros: PET e PTT (politrimetileno tereftalato). Essa fibra possui uma secção transversal oca siliconada.

### 3.1.1 Composição das amostras de nãotecidos

Para a realização dessa dissertação de mestrado, foram utilizadas inicialmente 3 diferentes misturas de fibras de PES, as quais foram denominadas controle, mistura A e mistura B). A amostra controle foi conduzida com uma mistura padrão, de uma composição já estabelecida. Na primeira etapa do estudo, todas as amostras de nãotecido foram constituídas com a mesma massa total de fibras e as mesmas proporções, havendo a substituição de um tipo de fibra (20 %) nas misturas A e B. Na Tabela 2 apresenta-se a proporção de cada fibra utilizada na mistura.

Tabela 2 – Proporção das fibras de poliéster utilizadas na composição dos nãotecidos

<b>Amostra</b>	<b>Fibra utilizada</b>	<b>Proporção mássica (%)</b>
Controle	Bi-4,4	20
	HR-11	40
	HC-8	20
	HC-15	20
Mistura A	Bi-4,4	20
	HR-11	40
	HC-8	20
	SR-1,4	20
Mistura B	Bi-4,4	20
	HR-11	40
	HC-8	20
	SR-3,3	20

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme descrição apresentada na Tabela 2, todas as composições apresentam 20 % da fibra bicomponente (Bi-4,4). A presença desta fibra é fundamental, pois ela é responsável pela consolidação da estrutura e fornece a resistência mecânica da composição fibrosa após a fusão.

Nas misturas A e B foram mantidos 3 componentes da formulação e substituiu-se a fibra oca conjugada virgem HC-15 por fibras sólidas regulares de títulos diretos 1,4 e 3,3 denier. Desta forma, a comparação entre as amostras controle e misturas permitirá avaliar a influência da estrutura (oca e sólida) e a influência do título direto nas propriedades dos



nãotecidos, sempre em um percentual de 20 %, conforme apresentado na Etapa I da Figura 8. A partir dos resultados das propriedades térmicas apresentada no item 4.2.2, a fibra SR-3,3 (sólida, regular com título direto de 3,3 denier) foi selecionada para a avaliação do efeito da proporção desta fibra no processamento e propriedades das amostras de nãotecido. Foram avaliadas 2 novas misturas com essa fibra (C e D), conforme detalhado no Tabela 3.

Também foi avaliado o efeito da inclusão da fibra de poliéster siliconada HCS-3,3 na composição dos nãotecidos, resultando nas misturas E e F são, com 20 % e 40 % na composição.

Tabela 3 – Descrição das fibras de poliéster utilizadas na composição dos nãotecidos.

<b>Amostra</b>	<b>Fibra utilizada</b>	<b>Proporção mássica (%)</b>
Mistura C	Bi-4,4	20
	HR-11	20
	HC-8	20
	SR-3,3	40
Mistura D	Bi-4,4	20
	HR-11	10
	HC-8	10
	SR-3,3	60
Mistura E	Bi-4,4	20
	HR-11	40
	HC -8	20
	HCS-3,3	20
Mistura F	Bi-4,4	20
	HR-11	20
	HC -8	20
	HCS-3,3	40

Fonte: Elaborado pelo autor

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Produção das amostras de nãotecidos

A produção das amostras de nãotecido foi realizada utilizando uma mistura de fibras, e seus respectivos percentuais, conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3. Foram utilizados aproximadamente 800 kg de mistura das fibras de PES, devido ao acerto e estabilização do processo. Na Figura 9 ilustra-se a abertura das fibras durante o início do processo de cardagem.

Figura 9 - Fardos de fibras nos carregadores



Fonte: Elaborado pelo autor

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  $1000 \text{ kg h}^{-1}$  de fibra de PES, e dois cilindros destacadores de fibras na saída, seguido de um dobrador de véus horizontal da marca HEISKY, com velocidade entrada de  $90 \text{ m min}^{-1}$  e capacidade de dobra de até 4 m de largura.

Durante a produção das amostras, a umidade do ar foi de aproximadamente 40 % e temperatura aproximada 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. Na Figura 10 apresenta-se o conjunto de equipamentos utilizados para a produção das amostras de nãotecidos, compostos pela carda, dobrador de véus e forno para a consolidação térmica.

Figura 10 – Equipamentos utilizados para a produção do nãotecido: 1) carda; 2) dobrador de véus e 3) forno para consolidação



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2.2 Caracterização das fibras

#### 3.2.2.1 Aspecto macroscópico e microscópico

O aspecto macroscópico das diferentes fibras foi registrado por fotografia digital. A análise microscópica das superfícies e das seções transversais fibras utilizadas como matéria-

prima foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um microscópio JEOL JSM-6390LV. Previamente às análises, as amostras foram recobertas com ouro no equipamento LEICA (EM SCD 500) para adquirir condutividade.

#### 3.2.2.2 *Espectrofotometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)*

Os grupos funcionais e modos vibracionais das moléculas das amostras de fibras foram avaliados por meio da técnica de espectroscopia no infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) em modo de refletância total atenuada (ATR) utilizando o equipamento da marca Agilent Technologies (modelo Cary 660 FTIR) da Central de Análises do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC. As amostras foram colocadas diretamente sobre a janela do cristal a uma média de 20 varreduras no intervalo de 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$  e resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ . Tal análise foi realizada com o intuito de comparar as diferentes fibras e avaliar a possível presença de impurezas nas fibras recicladas.

### 3.2.3 Caracterização dos nãotecidos

#### 3.2.3.1 *Aspecto macroscópico e microscópico*

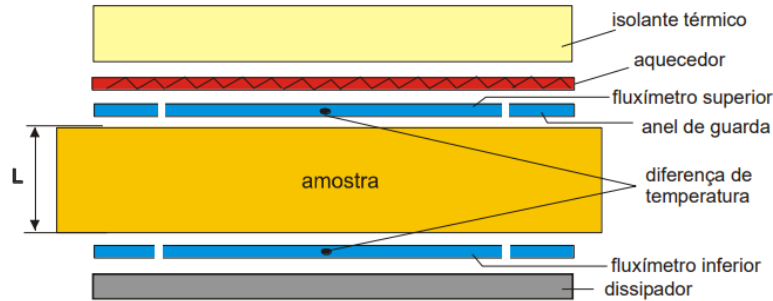
O aspecto macroscópico das amostras de nãotecido foi registrado por fotografia digital. Já a morfologia foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (JEOL, modelo JSM-6390LV). As amostras foram, inicialmente, depositadas em um *stub* e recobertas com ouro, por meio da técnica de “*sputtering*” em uma recobridora modelo EM SCD 500, da marca LEICA. Esta análise foi realizada no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC.

#### 3.2.3.2 *Determinação da condutividade e resistência térmica*

Os ensaios para determinação da condutividade térmica dos nãotecidos foram realizados no Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) da UFSC, baseado na Norma Técnica ASTM C-518: “*Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*”. A análise foi realizada em quintuplicata com amostras de dimensões 30,5 cm  $\times$  30,5 cm.

Na Figura 11 está ilustrado um esquema do dispositivo, onde L representa a espessura da amostra.

Figura 11 – Representação do dispositivo de medida da condutividade térmica das amostras de nãotecido.



Fonte: CB3E

A partir do ensaio, é possível obter o fluxo médio de calor medido pelos fluxímetros ( $q/A$ ) ( $W/m^2$ ) e as temperaturas das superfícies ( $T_1$  e  $T_2$ ) (K) da amostra de nãotecido. Utilizando a Lei de Fourier (Equação 3), obtém-se a resistência térmica do nãotecido ( $R$ ) ( $m^2 \cdot K/W$ ).

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{q/A} \quad (3)$$

Considerando que a amostra é homogênea, de espessura  $L$  (m), obtém-se a condutividade térmica do material  $k$  ( $W/m^2 \cdot K$ ) (Equação 4).

$$k = \frac{L}{R} \quad (4)$$

### 3.2.3.3 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise TGA foi conduzida para identificar a variação da massa das amostras de nãotecido em função da temperatura. Para isso, as amostras foram dispostas em um cadinho de alumina do equipamento marca TA instruments, modelo SDT-Q600, em atmosfera de ar isento de contaminantes, temperatura de 30 até 700 °C com uma taxa de aquecimento de 10 °C  $min^{-1}$ . Essa análise foi realizada no Laboratório de Controle e Processos de Polimerização do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC.

#### 3.2.3.4 *Calorimetria exploratória diferencial (DSC)*

Transições térmicas das amostras de não tecido foram também avaliadas por DSC. Essa análise foi conduzida no equipamento DSC, marca TA instruments modelo Q-20, sob uma faixa de temperatura de 25 a 300 °C, com rampa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, com uma atmosfera de nitrogênio com um fluxo de 20 mL min<sup>-1</sup>. Essa análise foi realizada na Central de Análises do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC.

#### 3.2.3.5 *Difração de raios X*

A estrutura cristalina das diferentes amostras de não tecido foi avaliada em um difratômetro de raios X Rigaku MiniFlex600, usando radiação Cu-K $\alpha$  a 45 kV e 40 mA. A radiação espalhada foi detectada na faixa  $2\theta = 10\text{--}60^\circ$  a uma taxa de 2° min<sup>-1</sup>. Essa análise foi realizada no Laboratório Interdisciplinar para o Desenvolvimento de Nanoestruturas (LINDEN) da UFSC.

#### 3.2.3.6 *Permeabilidade ao ar*

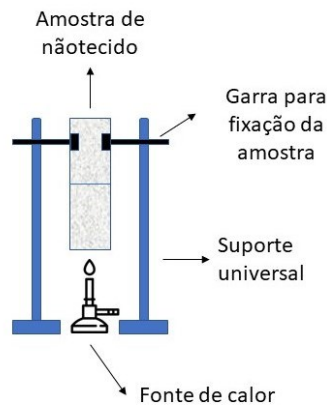
O ensaio de permeabilidade ao ar, também conhecido como resistência ao fluxo de ar, foi realizado em triplicata nas amostras de não tecido. Para este ensaio foi utilizado o equipamento TEXTTEST Instruments/FX3360.

A vazão de ar foi mensurada pelo volume em pés cúbicos que passam 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.

#### 3.2.3.7 *Teste de queima vertical*

O teste de queima das amostras de não tecido foi realizado por meio de uma adaptação na norma ASTM-D 6413:2008 “Método de teste padrão para resistência às chamas de têxteis (Teste Vertical)”. Os corpos de prova foram cortados com dimensões de 7,62 x 30 cm e foi feita uma marcação a 15 cm da base. As amostras foram posicionadas verticalmente com o auxílio de suportes universais e garras à uma altura que permitisse que a fonte de calor ficasse a uma distância de 2 cm da parte inferior do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Esquema do ensaio de queima vertical realizado nas amostras de nãotecido



Fonte: Elaborado pelo autor

A chama foi colocada em contato com a base da amostra por 12 s. A chama então era afastada e media-se o tempo de queima e o comprimento percorrido pela chama na amostra. Por segurança, a chama era apagada da amostra quando atingisse a marcação de 15 cm. O ensaio foi realizado em capela de exaustão com 4 repetições para cada amostra.

### 3.2.4 Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada por meio de análises de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, o qual foi utilizado para determinar as diferenças significativas das médias, a um nível de probabilidade de 5 % ( $p < 0,05$ ). Foi utilizado o programa computacional SAS System (SAS Institute Inc., EUA).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

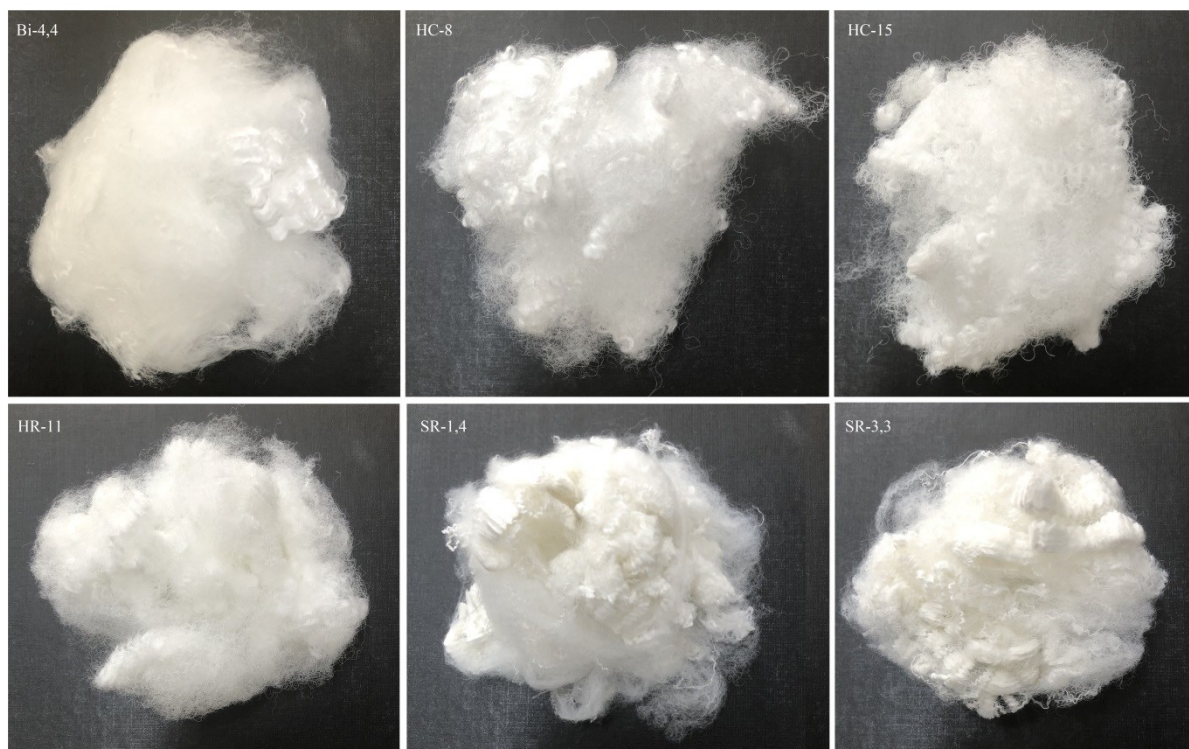
Nesta seção, inicialmente, são apresentados os resultados relacionados à caracterização das fibras utilizadas para a obtenção dos não tecidos. Na sequência, são avaliadas as propriedades dos não tecidos produzidos com diferentes proporções de fibras recicladas na composição e, também, com a fibra térmica.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS

#### 4.1.1 Aspecto macroscópico e microscópico

Na Figura 13 estão apresentadas imagens das diferentes fibras utilizadas para a produção dos não tecidos. Macroscopicamente, verifica-se que as fibras conjugadas HC-8 e HC-15 apresentam uma maior ondulação do que as demais fibras, o que é característico das fibras conjugadas. Nas fibras regulares (HR ou SR) verifica-se um aspecto mais frisado.

Figura 13 – Fotografias das fibras utilizadas para a produção dos não tecidos

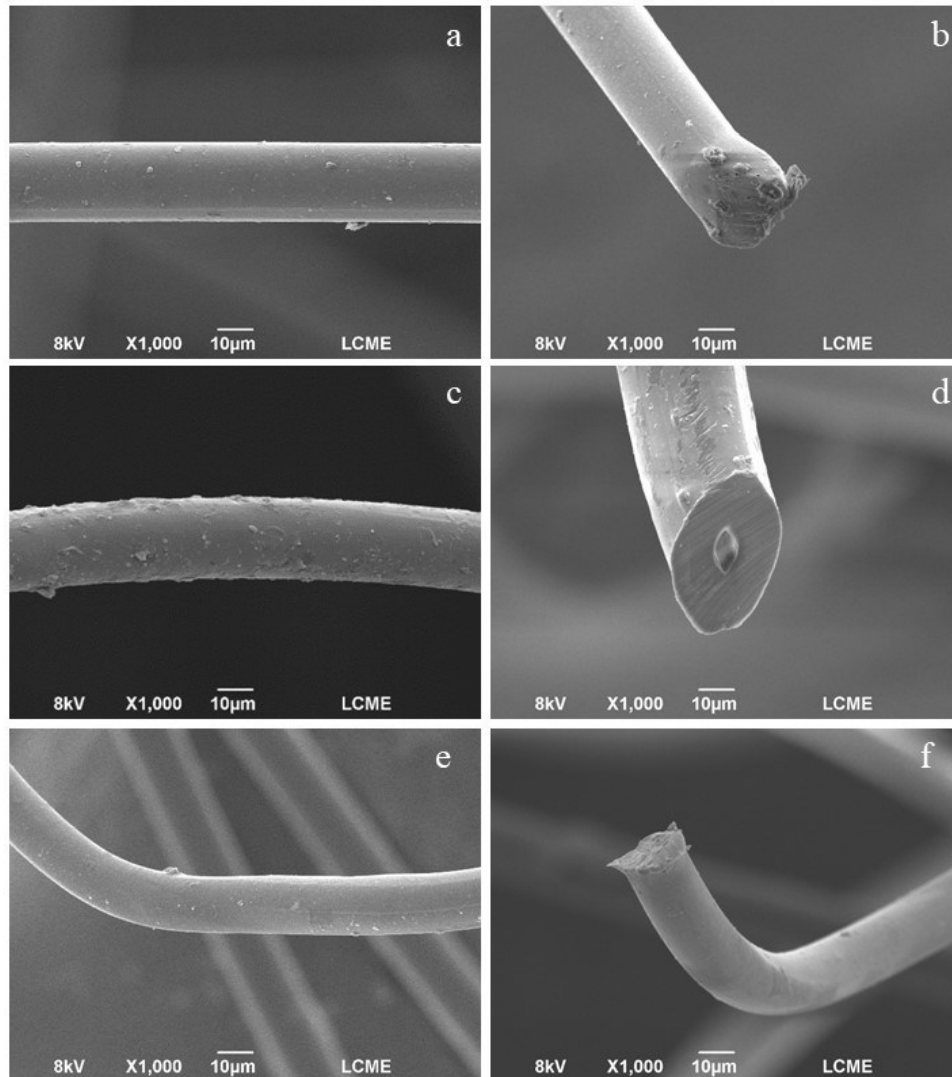


Fonte: Elaborado pelo autor



A morfologia de uma fibra bicomponente, oca conjugada e sólida regular pode ser observada nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da Figura 14.

Figura 14 – Imagens de MEV das fibras utilizadas para a produção dos nãotecidos: Bi-4,4 (a-b), HC-15 (c-d) e SR-3,3 (e-f)

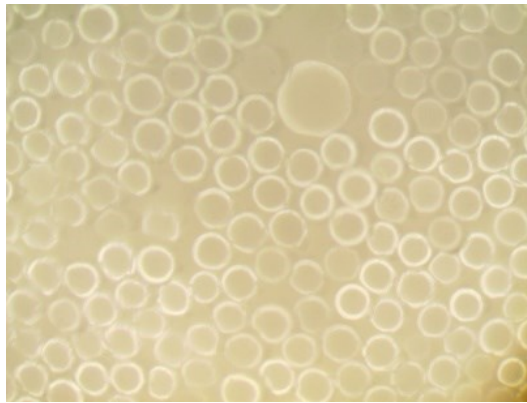


Fonte: Elaborado pelo autor

De forma geral, as fibras apresentam morfologia típica das fibras sintéticas, com superfície homogênea e regular, incluindo a fibra reciclada. Pode-se observar nas imagens a presença de pequenos aglomerados sobre os filamentos, que podem ser resíduos do processo de produção do fio (lubrificantes para melhorar o desempenho dos filamentos nos equipamentos que serão submetidos) ou a formação de oligômeros que são formados no processo de polimerização e acabam ficando posteriormente na superfície do filamento de

poliéster. A micrografia da seção transversal da fibra bicomponente (Figura 14b) indica uma estrutura sólida, mas não foi possível distinguir a existência de uma casca e um núcleo. Essa característica pôde ser identificada por microscopia óptica, cuja imagem está apresentada na Figura 15, onde é possível observar halos mais claros, referentes ao material externo da fibra; e um núcleo mais escuro, referente ao material interno. A microscopia da seção transversal da fibra HC (Figura 14d) permite identificar a região interna oca da fibra. Já a fibra reciclada (Figura 14f) possui uma seção transversal sólida.

Figura 15 – Imagem de microscopia óptica da seção transversal da fibra bicomponente Bi-4,4.



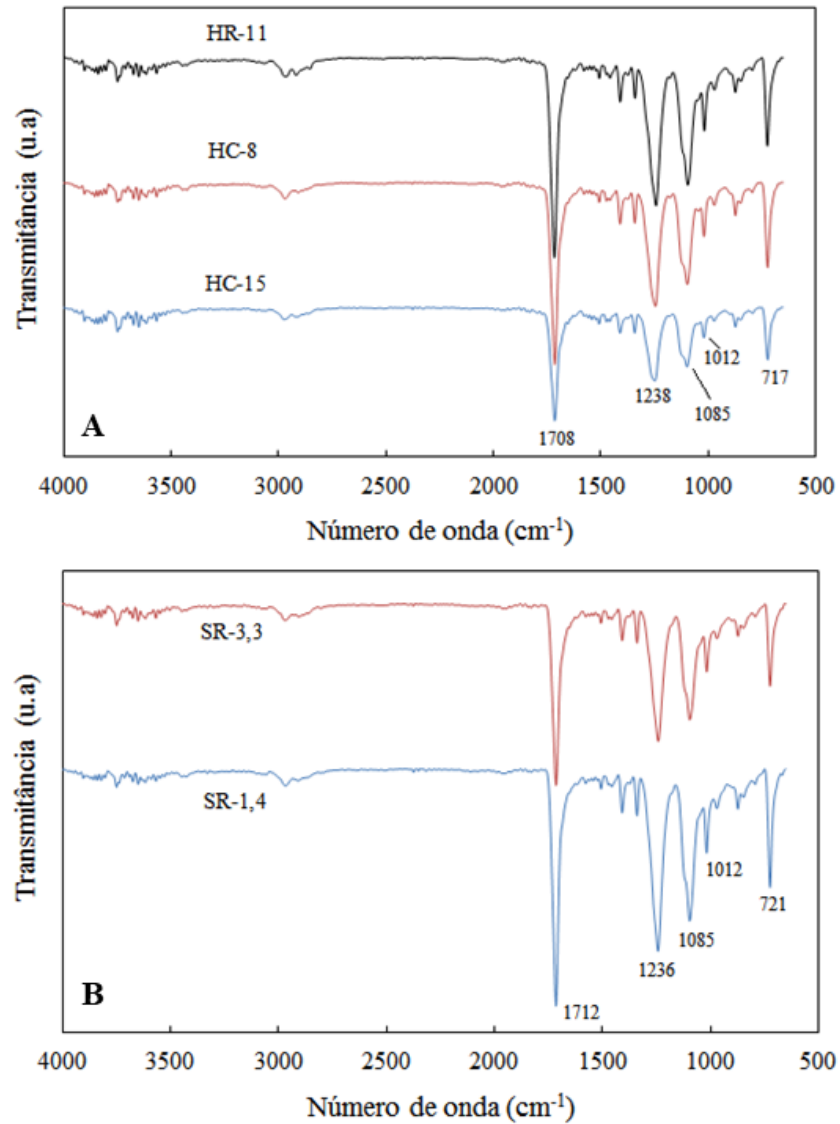
Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.2 Caracterização dos grupos funcionais das fibras

As diferentes fibras utilizadas para a obtenção dos nãotecidos foram avaliadas por espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e os espectros resultantes das fibras ocas virgens (tipo HC) e sólidas recicladas (tipo SR) estão apresentados nas Figuras 16 a e b, respectivamente.

De forma geral, os espectros das fibras HC e HR apresentaram bandas características do poliéster, como na região de  $1708\text{ cm}^{-1}$  que representa o estiramento C=O dos grupos carbonila. O estiramento C–O e a deformação O–H são identificadas em  $1413$  e  $1472\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente. Bandas em  $1085$  e  $1236\text{ cm}^{-1}$  estão relacionadas ao grupo tereftalato (OOC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-COO). A banda em  $877\text{ cm}^{-1}$  e está relacionada ao anel de benzeno. A banda encontrada na região de  $717\text{ cm}^{-1}$  está relacionada à deformação angular (CH<sub>2</sub>) (GABARDO et al., 2021).

Figura 16 – Espectro FTIR das fibras HR-11, HC-8, HC-15 (a) e SR-3,3,SR-1,4 (b)



Fonte: Elaborado pelo autor

Não foram observadas diferenças nos espectros das diferentes fibras do tipo HC. Este resultado já era esperado pelo fato destas serem constituídas de fibras virgens, sem inclusão de outras matérias-primas que pudessem indicar alteração de composição química. Ambas as fibras HC-8 e HC-15 possuem as mesmas características, oca e conjugada, diferenciando-se somente pelo título da fibra.

A comparação dos espectros das fibras sólidas regulares recicladas (Figura 16 b) indica a presença dos mesmos picos característicos do poliéster. Este resultado indica que as fibras recicladas apresentam elevada pureza.

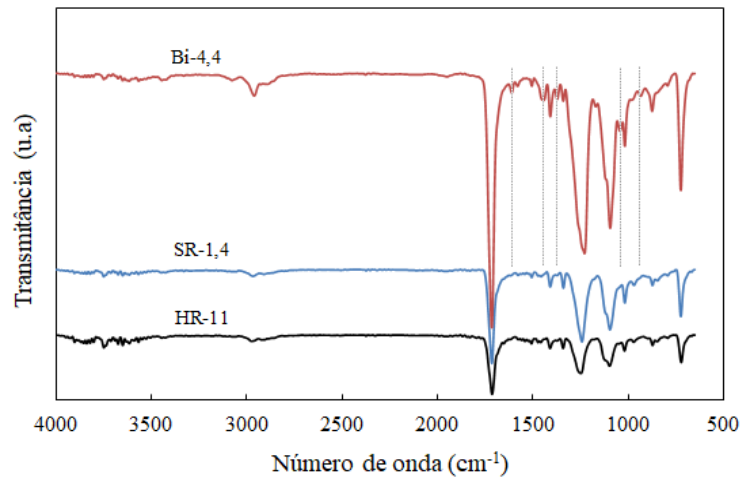
Na Figura 17 são apresentados os espectros FTIR de uma fibra HR (HR-11), SR (SR-1,4) e da fibra bicomponente (Bi-4,4). A comparação dos espectros das fibras HR e SR confirmam a semelhança dos grupamentos químicos presentes na fibra. No entanto, a fibra bicomponente apresenta bandas distintas, nas regiões de 1610, 1577, 1438, 1371, 1168 e 1022  $\text{cm}^{-1}$ .

As fibras bicomponentes são obtidas a partir da extrusão de dois polímeros na mesma feira resultando na presença de ambos os polímeros no mesmo filamento (KALEBEK; BABAARSLAN, 2016). Os dois polímeros podem ser extrudados com diferentes formas de seção transversal, a fim de obter várias configurações, ou seja, núcleo/casca, lado a lado, ou ilha no mar. Durante o aquecimento, um polímero funciona como componente de baixo ponto de fusão e amolece para formar a ligação; enquanto o outro funciona como componente de maior fusão mantém sua forma e sua integridade estrutural (MOCHIZUKI; MATSUNAGA, 2016).

Portanto, as fibras bicomponentes são normalmente aplicadas para autoligação em não tecidos com o objetivo de utilizar temperaturas de consolidação mais baixas do que o processo de consolidação térmico usual (NAEIMIRAD et al., 2018). Drochytka, Dvorakova e Hodn (2017) usaram fibras bicomponentes para consolidar fibras de resíduos de poliéster produzindo não tecidos com desempenhos térmicos e acústicos comparáveis aos painéis de lã de rocha mineral. A utilização desse tipo de fibra é ecologicamente mais correta do que a utilização de agentes químicos, uma vez que promovem a adesão somente por calor e pressão. Além disso, tendem a ser mais econômicas em virtude do menor consumo de energia em decorrência de envolver menor evaporação de água durante a consolidação (RUSSEL, 2006).

A fibra bicomponente utilizada neste estudo é produzida por fiação de poliéster convencional e poliéster modificado de baixo ponto de fusão. Assim, ela é constituída por um núcleo que funde a elevada temperatura (260 °C) e uma bainha exterior que se funde a uma temperatura de aproximadamente 110°C (HUVIS, 2023). O poliéster convencional é, geralmente, o poli (tereftalato de etileno) (PET,  $T_f \sim 260$  °C) ou poli (tereftalato de butileno) (PBT,  $T_f \sim 223$  °C). O poliéster tende a ser o copoliéster de poli(tetraóxido de metileno) (PTMO). No momento em que são aquecidos, os materiais da bainha que possuem a fusão mais baixa derretem e unem as fibras para a consolidação dos não tecidos, resultando em excelentes propriedades mecânicas e flexibilidade (GUO et al., 2021).

Figura 17 – Espectro FTIR resultante das fibras Bi-4,4, SR-1,4, HR-11



Fonte: Elaborado pelo autor

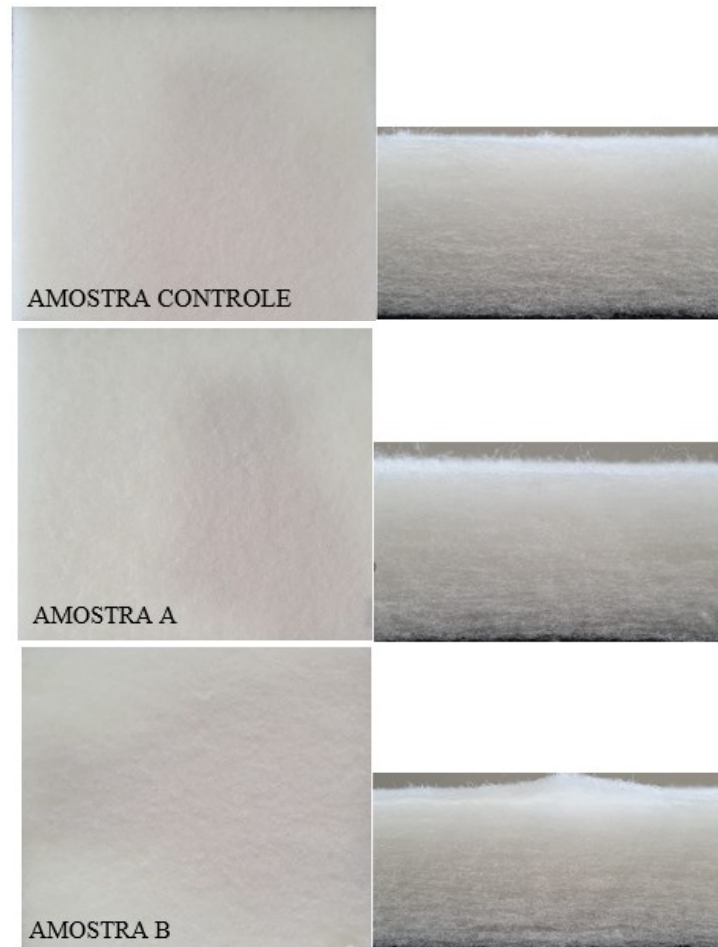
## 4.2 DESENVOLVIMENTO DE NÃOTECIDOS COM FIBRA RECICLADA: SUBSTITUIÇÃO DE 20 %

A parte inicial dessa dissertação de mestrado envolvendo a produção de nãotecidos consistiu em avaliar a influência da substituição da fibra HC-15 (oca, conjugada e virgem), que estava presente na mistura padrão na proporção de 20 %, por fibras sólidas, regulares e recicladas de diferentes títulos (SR-1,4 e SR-3,3).

### 4.2.1 Aspecto macroscópico dos nãotecidos

Na Figura 18 estão apresentados os aspectos macroscópicos das amostras A (com 20 % da fibra reciclada SR-1,4) e B (com 20 % da fibra reciclada SR-3,3). De forma geral, ao comparar o aspecto da amostra controle com as amostras contendo 20 % de fibra reciclada, verifica-se que houve a formação adequada das estruturas, sendo que a diferença de título não influenciou o processo de produção e a consolidação das camadas.

Figura 18 - Aspecto macroscópico da superfície e da seção transversal das amostras controle, A e B.



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.2 Propriedades térmicas

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados para espessura, densidade e propriedades térmicas para a amostra de não tecido controle, mistura A e mistura B. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as amostras para a condutividade ( $k$ ) e a resistência térmica ( $R$ ). Esses resultados mostram que a substituição de 20 % da fibra oca conjugada virgem por fibras sólidas regulares de origem reciclada não influencia as propriedades de condutividade térmica e de resistência do não tecido.

Tabela 4 – Quantificação das propriedades térmicas das amostras controle, A e B

<b>Amostra</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade (mW/m·K)</b>	<b>Resistência m<sup>2</sup>·K/W</b>
Controle	38,30	26,70	41,09 ± 0,78 <sup>a</sup>	0,933 ± 0,017 <sup>a</sup>
Mistura A	35,70	28,10	39,62 ± 0,77 <sup>a</sup>	0,901 ± 0,017 <sup>a</sup>
Mistura B	35,70	28,90	39,59 ± 0,69 <sup>a</sup>	0,901 ± 0,015 <sup>a</sup>

Letras iguais na mesma coluna indicam que não há diferença estatisticamente significativa pelo Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os valores estatisticamente iguais podem ser atribuídos à semelhança entre as condutividades das fibras isoladas e, também, à baixa proporção da fibra reciclada na mistura. A comparação entre os valores de condutividade da mistura A e B (1,4 e 3,3, respectivamente) também indicam que o aumento do título direto não influenciou significativamente esta propriedade.

Para ser considerado um material isolante, a condutividade térmica deve ser menor que 0,1 W/m·K, ou seja, 100 mW/m·K. Materiais com condutividades abaixo de 30 mW/m·K são considerados isolantes muito bons, enquanto entre 30 e 50 mW/m·K são considerados moderados. Materiais com condutividades acima de 70 mW/m·K são considerados pouco efetivos para isolamento em edificações (ANH; PÁSZTORY, 2021). Com os valores de condutividade obtidos, os nãotecidos a base de PES podem ser considerados isolantes moderados.

Os valores obtidos estão de acordo ao observado na literatura para amostras de nãotecido contendo fibras de PES. Yang et al. (2020), por exemplo, produziram nãotecidos de diferentes densidades constituídos por 45 % de fibra PES conjugada, 30 % de fibra PES oca e 25 % de fibra PES bicomponente e obtiveram condutividade térmica de 39,12 a 57,26 mW/m·K, sendo que o valor da condutividade reduziu em função do aumento da densidade do nãotecido.

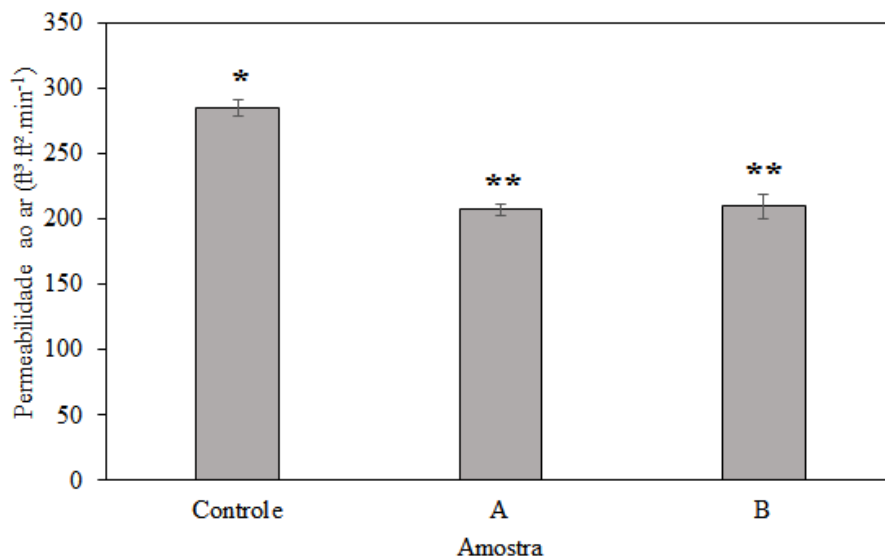
A resistência térmica (R) está relacionada à resistência oferecida por um dado material ao fluxo de calor, sendo a razão entre a espessura e a condutividade térmica. Em valores absolutos, houve redução da resistência térmica em decorrência da redução da espessura do nãotecido. Verifica-se que a espessura reduziu e a densidade das amostras contendo a fibra reciclada aumentou, o que pode ser atribuído ao menor título direto das fibras

e à sua estrutura sólida. A diferença da resistência em comparação com a amostra controle, no entanto, não foi significativa.

#### 4.2.3 Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar é descrita como a taxa de fluxo de ar que passa perpendicularmente através de uma área conhecida, sob um diferencial de pressão de ar prescrito entre as duas superfícies de um material (KUMAR; MUTHU, VINOTH, 2022). Na Figura 19 apresentam-se os resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar para as amostras controle, A e B. A amostra controle apresentou permeabilidade ao ar significativamente maior do que as demais amostras. Este resultado já era esperado pela menor concentração de fibras na amostra controle, em função do maior título direto utilizado. Essas características permitiram um maior fluxo de ar entre o nãotecido.

Figura 19 - Permeabilidade ao ar para as amostras controle, A e B



Fonte: Elaborado pelo autor

As fibras SR da amostra A possuem um título médio de 1,4 denier. Já as fibras SR da amostra B possuem valores do título cerca de 2,4 vezes maior (3,3 denier). A tendência é de que quanto maior o título, maior a permeabilidade ao ar devido à menor concentração de fibras. No entanto, permeabilidade das amostras A ( $210 \text{ ft}^3 \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ) e B ( $207 \text{ ft}^3 \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ) foi significativamente igual, o que pode ser atribuído à baixa proporção dessas fibras na amostra de nãotecido. Os resultados de permeabilidade ao ar corroboram com os resultados de



espessura e densidade apresentados na Tabela 4. A redução da espessura e o aumento da densidade implicam em poros menores na estrutura, o que dificulta a passagem de ar.

Embora a contribuição da transferência de calor por convecção seja muito pequena nas estruturas de isolamento térmico, baixos valores de permeabilidade ao ar podem ser relacionados a menores taxas de transferência de calor por convecção. Zhu et al. (2015) desenvolveram um dispositivo para determinar a resistência térmica convectiva de estruturas têxteis e confirmaram a correlação entre a permeabilidade ao ar e a resistência térmica convectiva, sendo que a resistência diminui com o aumento da permeabilidade ao ar.

Ainda, de acordo com Wasna et al. (2019), o controle da permeabilidade ao ar é uma questão muito importante no contexto do desempenho energético dos edifícios, sendo que a passagem de ar nas estruturas deve ser restringida para que o isolamento funcione corretamente. Ozturk, Nergis e Candan (2017) mostram que as propriedades de permeabilidade ao ar de estruturas multicamadas tendem a diminuir com o aumento da massa por área, da espessura e do número de camadas da estrutura. Neste estudo, foi comparada a permeabilidade ao ar de diferentes não tecidos de única camada compostas por polipropileno utilizando diferentes técnicas de formação (*Spunbond*, *Meltblown*) e utilizando água na sua consolidação (*Spunlace*). Foi verificado que a estrutura produzida pela técnica *Meltblown* resultou na menor permeabilidade ao ar (384 L/m<sup>2</sup>/s). Isso era esperado, uma vez que essa tecnologia permite a obtenção da disposição de fibras mais finas devido a presença de um jato de ar durante sua disposição, permitindo a obtenção de fibras com maior área superficial. As técnicas *Spunbond* e *Spunlace* apresentaram permeabilidade ao ar de 490 e 889 L/m<sup>2</sup>s, respectivamente.

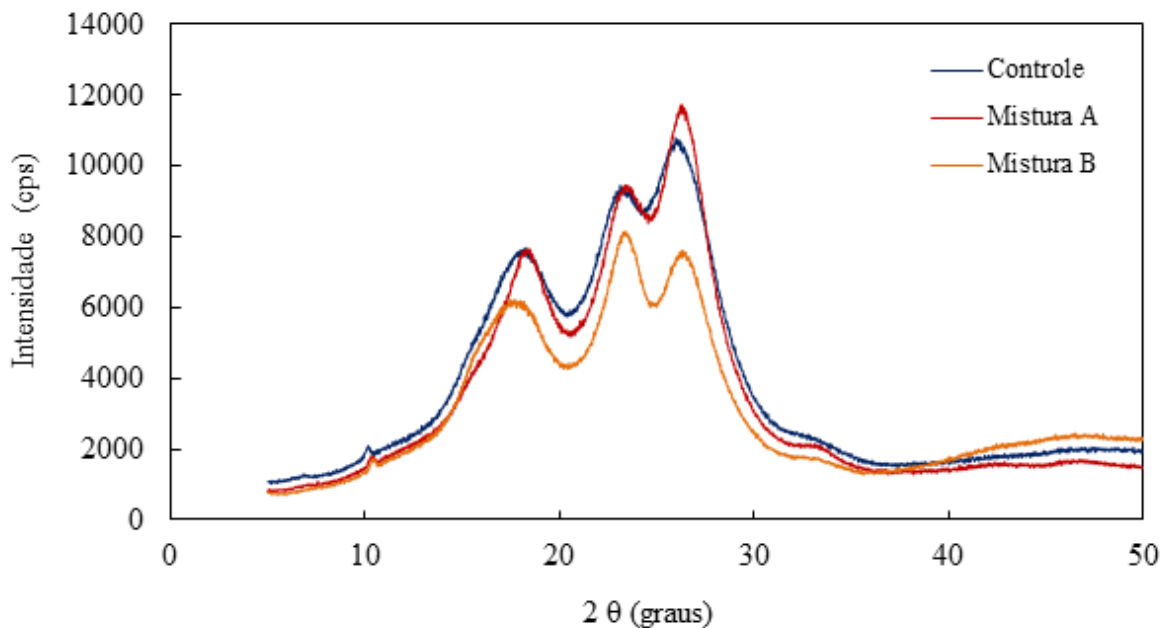
A permeabilidade ao ar dos não tecidos aumenta com o aumento da porosidade e o gradiente de pressão. Zhu et al. (2015) apontam que o fator de tortuosidade, a razão entre o comprimento efetivo ou tortuoso da via e a espessura da amostra são parâmetros importantes na determinação do fluxo através do não tecidos.

#### **4.2.4 Difração de raios X**

Na Figura 20 apresenta-se os padrões de difração de raio X das diferentes amostras. Os picos de reflexão em  $2\theta$  foram identificados próximo a 18°, 23°, e 25° para todas as amostras avaliadas. O tecido de PES apresenta picos de difração característicos nas seguintes posições 17°, 22,7° e 25,3° (FENG et al., 2016). Shao e Wei (2018), ao analisarem os picos de

difração de raio X de um nãotecido produzido com fibras de PES identificaram picos de reflexão em  $2\theta = 17,4^\circ$ ,  $22,7^\circ$  e  $25,4^\circ$ . Já Majumdar et al. (2020) verificaram picos de difração em  $17,7^\circ$ ,  $22,9^\circ$  e  $25,6^\circ$ . Os padrões de difração observados para as amostras de nãotecido são, portanto, condizentes com a literatura para materiais a base de poliéster.

Figura 20 – Difração de raios X das amostras controle, A e B



Fonte: Elaborado pelo autor

Os difratogramas revelam estruturas tipicamente semicristalinas. Em escala microscópica, os polímeros semicristalinos são materiais heterogêneos, representados como domínios cristalinos dispersos em uma matriz amorfa. Enquanto a fase cristalina contém segmentos muito organizados, as regiões amorfas consistem em segmentos de cadeia desordenada (MORKWENA; TANG, 2012). O percentual de cristalinidade das amostras, calculado pela razão entre a área sob os picos e a área total, foi calculado como sendo de 20,3 % para a amostra controle, 27,9 % para a amostra A e 32,4 % para a amostra B. Mosavi-Mirkolaei, Najafi e Tajvidi (2019) compararam a cristalinidade do PET reciclado com o PET virgem por DRX e obtiveram valores de 23 % para o material virgem e 27,4 % para o reciclado. Essa mesma tendência foi observada por He et al. (2014), mas esses autores obtiveram maior diferença, sendo 26,5 % para a fibra virgem e 42,5 % para a reciclada. Cabe ressaltar que o grau de impurezas pode variar nas fibras recicladas e influenciar nesse resultado. Em termos globais, os valores são similares aos obtidos para o material nãotecido.

O aumento da cristalinidade das amostras A e B pode ser decorrente da presença de 20 % da fibra reciclada na formulação. Os resultados também demonstram que o aumento do título contribuiu para o aumento da cristalinidade.

Em geral, polímeros com elevada cristalinidade apresentam maiores valores de condutividade térmica do que os polímeros amorfos devido à estrutura ordenada (XUE; LOFLAND; HU, 2019). No entanto, as propriedades dos polímeros semicristalinos estão relacionadas não apenas ao grau de cristalinidade, que indica as proporções relativas das fases cristalina e não cristalina, mas também às características cristalinas, como o tamanho e a perfeição dos cristais (MORKWENA; TANG, 2012). Cabe também ressaltar que outros fatores como densidade, temperatura, porosidade, impurezas e orientação dos grãos cristalinos podem influenciar a condutividade térmica e podem ter contribuído para que não fossem observadas diferenças significativas entre os resultados de condutividade.

Embora o aumento da cristalinidade possa impactar negativamente na condutividade térmica e, conseqüentemente, na transferência de calor por condução, a literatura tem reportado que a permeabilidade ao ar é reduzida com o aumento da cristalinidade (AULIN; GÄLLSTEDT; LINDSTRÖM, 2010; MORKWENA; TANG, 2012). Isso ocorre porque as regiões cristalinas do polímero não são permeáveis. Os resultados de cristalinidade se correlacionam bem com os resultados de permeabilidade ao ar, que mostraram que as amostras contendo as fibras recicladas tiveram essa propriedade reduzida.

Levando em consideração que a substituição de 20 % não comprometeu a formação do não tecido, que não houve comprometimento da condutividade térmica e que houve redução da permeabilidade ao ar, a próxima etapa do estudo avaliou a substituição da fibra oca virgem pela fibra reciclada em crescentes proporções na formulação. Em relação ao título, como não houve diferença significativa das propriedades térmicas e da permeabilidade ao ar, a fibra SR-3,3 foi selecionada considerando a observação de que maiores títulos proporcionaram melhor consolidação do não tecido.

#### 4.3 EFEITO DA PROPORÇÃO DE FIBRA RECICLADA NAS PROPRIEDADES DOS NÃO TECIDOS

Nesta etapa do estudo foi selecionada a fibra SR-3,3 e avaliou-se o efeito de crescentes proporções dessa fibra nas propriedades dos não tecidos.

#### 4.3.1 Aspecto macroscópico

A Figura 21 mostra a comparação do aspecto macroscópico das amostras de nãotecido com proporções de 20 % (amostra B), 40 % (amostra C) e 60 % (amostra D) de fibra reciclada SR-3,3 na mistura.

Figura 21 – Aspecto macroscópico da superfície e da seção transversal das amostras B, C e D



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise do aspecto visual das amostras evidenciou que o aumento do percentual das fibras SR – 3,3 na composição do nãotecido prejudica a formação adequada da estrutura.

Quando a proporção de fibra reciclada foi alterada para 60 % (amostra D), foi possível observar que a consolidação das fibras não ficou uniforme e houve descolamento das camadas (parte superior da imagem transversal). Isso acontece devido à elevada proporção de fibra fina na formulação em relação à proporção de fibra bicomponente, impedindo a consolidação.

De acordo com o aspecto macroscópico, o percentual máximo de fibras recicladas SR-3,3 que resultem em um produto com as camadas unidas é de 40 % (amostra C).

De acordo com o aspecto macroscópico, o percentual máximo de fibras recicladas SR-3,3 que resultem em um produto com as camadas unidas é de 40 %.

#### 4.3.2 Propriedades térmicas

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados referentes às propriedades de espessura, densidade e propriedades térmicas para a amostra controle e para as amostras produzidas com diferentes proporções da fibra reciclada SR-3,3. A comparação dos valores de condutividade térmica indica que houve uma redução significativa desta propriedade nas amostras C e D, ou seja, a utilização de 40 e 60 % de fibra reciclada é capaz de alterar a condutividade do nãotecido. Ainda, a amostra D apresentou condutividade térmica significativa menor do que a amostra C.

Pode se observar na Tabela 5 que a alteração da fibra HC-15 (controle) para fibra SR-3,3 provocou uma redução na espessura do material. Isso já era esperado devido a fibra SR-3,3 ser uma fibra de título menor. A diferença da espessura e, portanto, da densidade das amostras foi responsável pela mudança da condutividade térmica.

Tabela 5 – Quantificação das propriedades térmicas das amostras controle, B, C e D

<b>Amostra</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade térmica (W/m·K)</b>	<b>Resistência térmica (m<sup>2</sup>·K/W)</b>
Controle	38,3	26,7	41,09 ± 0,78 <sup>a</sup>	0,933 ± 0,017 <sup>ab</sup>
Amostra B	35,7	28,9	39,59 ± 0,69 <sup>a</sup>	0,901 ± 0,015 <sup>b</sup>
Amostra C	35,0	34,3	36,81 ± 0,77 <sup>b</sup>	0,951 ± 0,020 <sup>a</sup>
Amostra D	30,0	36,8	35,16 ± 0,86 <sup>c</sup>	0,854 ± 0,021 <sup>c</sup>

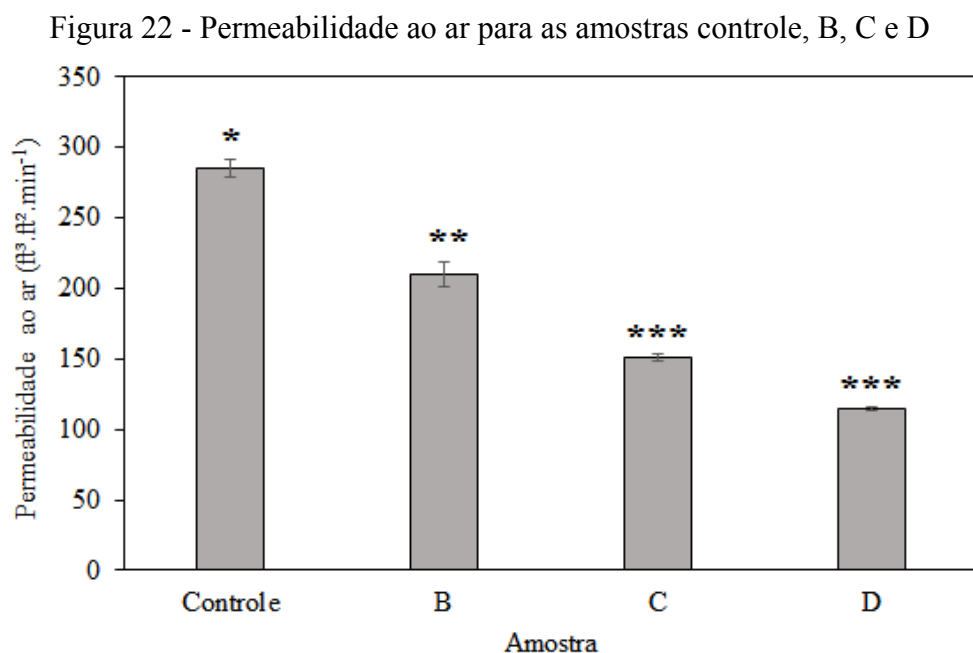
Letras iguais na mesma coluna indicam que não há diferença estatisticamente significativa pelo Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

O comportamento da redução da condutividade em materiais poliméricos e inorgânicos com o aumento da densidade foi observado em outros estudos. Por exemplo, a condutividade do poliestireno expandido diminuiu de 0,043 para 0,032  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  com o aumento da densidade de 14 para 38  $\text{kg}/\text{m}^3$  (GNIP; VÉJELIS; VAITKUS, 2012). Essa tendência foi também verificada por Koru (2016), ao investigar 17 diferentes amostras inorgânicas com densidade variando entre 8,9 e 60  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Ahn e Pásztor (2021) reportam que o aumento da densidade implica na redução do tamanho dos poros de ar e, conseqüentemente, a transferência de calor por condução no gás torna-se menor e a transferência de calor é regida pelas fibras sólidas.

A resistência térmica da amostra C foi significativamente maior que da amostra D, devido às diferenças de espessura. Nas condições apresentadas, portanto, a amostra C, com maior resistência e menor condutividade, seria a formulação com melhor potencial de isolamento térmico – sem contar que a amostra D não apresentou regularidade durante a etapa de consolidação.

#### 4.3.3 Permeabilidade ao ar

Na Figura 22 estão apresentados os resultados do teste de permeabilidade ao ar das amostras controle, B, C e D.



Fonte: Elaborado pelo autor

Pode se observar uma tendência bem definida de redução da permeabilidade ao ar com o aumento da proporção de fibra reciclada na mistura. A amostra controle apresentou permeabilidade de  $285 \text{ ft}^3 \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ . Já a amostra B, em que a fibra HC-15 é substituída pela fibra SR-3,3 na mesma proporção, apresentou um valor de  $210 \text{ ft}^3 \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ . A permeabilidade ao ar da amostra C, com 40% de substituição, foi de  $151 \text{ ft}^3 \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{min}^{-1}$  enquanto da amostra D foi de  $115 \text{ ft}^3 \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ .

A redução foi significativa até a proporção de 40 %, sendo que entre as amostras C e D não houve diferença significativa.

Os valores mais baixos da permeabilidade das amostras B e C se correlacionam bem com as menores espessuras e maiores densidades destas em decorrência do menor título direto. Embora tenham sido observados problemas na cardagem e na consolidação da estrutura, sobretudo na amostra com 60 % de fibra reciclada, onde foi observado o descolamento das camadas, a propriedade de permeabilidade ao ar foi positivamente afetada nestas amostras. Considerando os resultados de resistência térmica por condução e os resultados de permeabilidade ao ar, a utilização de 40 % de fibras recicladas mostrou-se positiva para a aplicação.

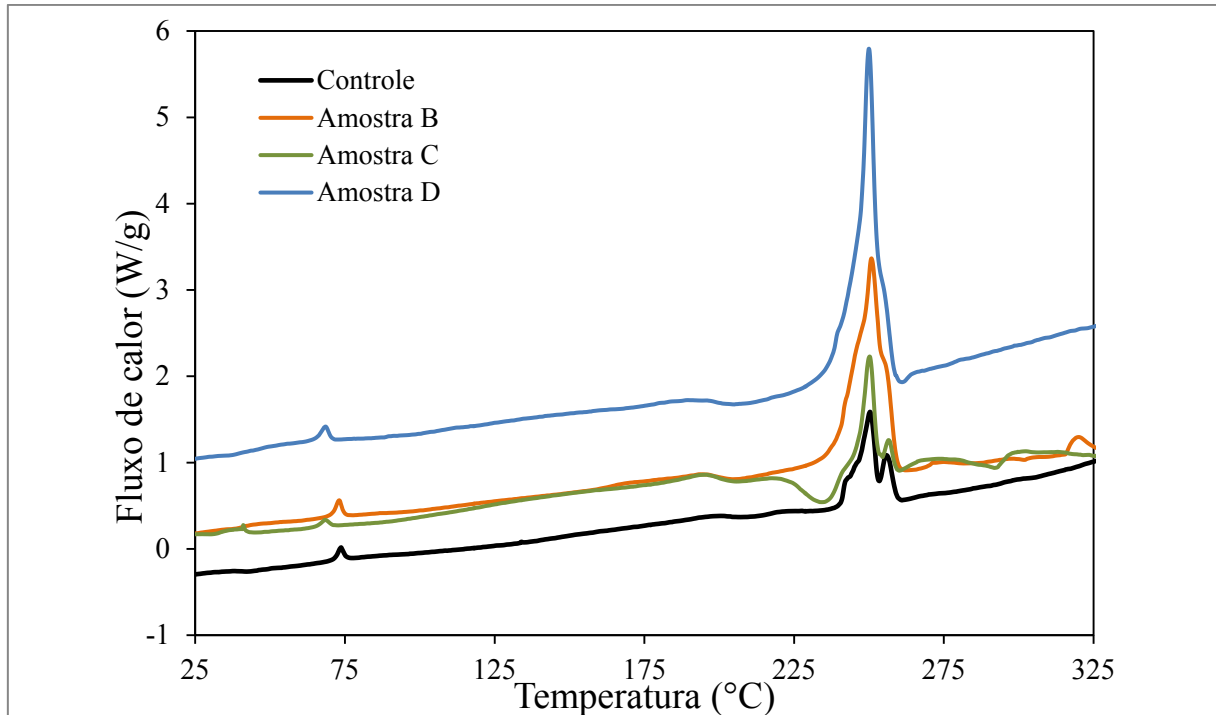
#### 4.3.4 DSC

Na Figura 23 estão apresentados os resultados de DSC para as diferentes amostras de nãotecido, obtidos em um ciclo de aquecimento. Dois eventos térmicos podem ser observados para todas as amostras, um em torno de  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  e outro em torno de  $255 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A primeira transição ocorreu entre  $69,3$  e  $73,9 \text{ }^\circ\text{C}$  e refere-se à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ). A temperatura de transição vítrea,  $T_g$ , é uma transição térmica de segunda ordem, fornecendo informações do amolecimento da porção amorfa de um polímero à medida que a temperatura é elevada. Existem diferentes fatores que afetam a  $T_g$  dos polímeros, como estrutura molecular e distribuição de peso molecular, grupos polares ou grau de reticulação. De acordo com Celik, Shamsuyeva e Endres (2022), os valores de  $T_g$  para o PET reciclado tendem a ficar entre o mínimo e máximo observado para o PET virgem, cujas temperaturas são de  $69 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $115 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. Em geral, os valores mais reportados na literatura para a  $T_g$  do PET são na faixa de  $80\text{--}90 \text{ }^\circ\text{C}$  (BACCOUCH et al., 2022). Atakan,

Sezer e Karakas (2020) compararam o comportamento térmico de fibras virgens e recicladas de PET e observaram pouca variação na  $T_g$ , que ficou em torno  $77\text{ }^\circ\text{C}$ .

Figura 23 – Termogramas de fluxo de calor das amostras controle, B, C e D



Fonte: Elaborado pelo autor

O segundo evento térmico, em torno de  $250\text{ }^\circ\text{C}$ , refere-se à temperatura de fusão (*melting point*) do poliéster. A literatura registra o ponto de fusão para o PET em torno de  $260\text{ }^\circ\text{C}$ . Em relação aos materiais virgens e reciclados, Atakan, Sezer e Karakas (2020) observaram uma leve redução na temperatura de fusão no PET reciclado ( $252\text{ }^\circ\text{C}$ ) em relação ao PET virgem ( $259\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Nas amostras controle e amostra C é possível observar que o evento de fusão apresentou uma separação em dois picos. Liu et al. (2016) observaram dois picos de fusão em  $249,6\text{ }^\circ\text{C}$  (endotérmico I) e  $255,2\text{ }^\circ\text{C}$  (endotérmico II). A temperatura endotérmica I representa a fusão de cristalitos formados na temperatura de cristalização isotérmica, enquanto a endotérmica II representa a fusão de cristais menos estáveis que sofrem reorganização. O pico de fusão mais baixo pode estar também a cristalitos com tamanho pequeno e menos perfeição.

O fato desse comportamento não ter sido observado em todas as amostras pode estar relacionado à heterogeneidade do nãotecido. Como a massa utilizada para a análise é pequena ( $\sim 10\text{ mg}$ ), é possível que tenham sido analisadas amostras contendo frações maiores de

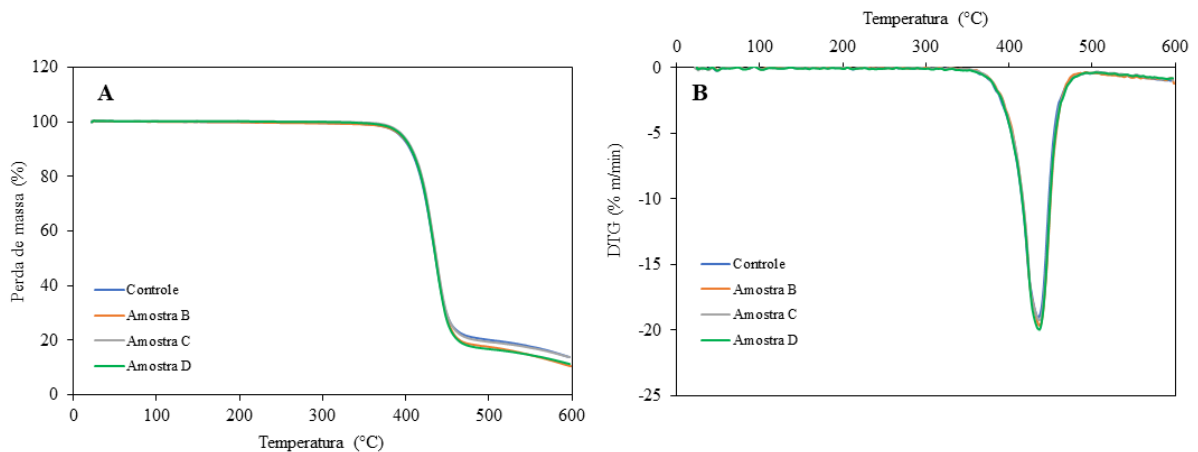


determinada fibra. De forma geral, a análise de DSC mostrou que as diferentes proporções de fibra reciclada têm pouca influência na temperatura de transição vítrea e na temperatura de fusão dos nãotecidos.

#### 4.3.5 Análise termogravimétrica

As amostras de nãotecido foram também avaliadas por termogravimetria e os resultados das curvas de perda de massa por temperatura (TG) e da derivada da perda de massa (DTG) estão apresentadas na Figura 24 a e b, respectivamente.

Figura 24 – Curvas termogravimétricas das amostras controle, B, C e D



Fonte: Elaborado pelo autor

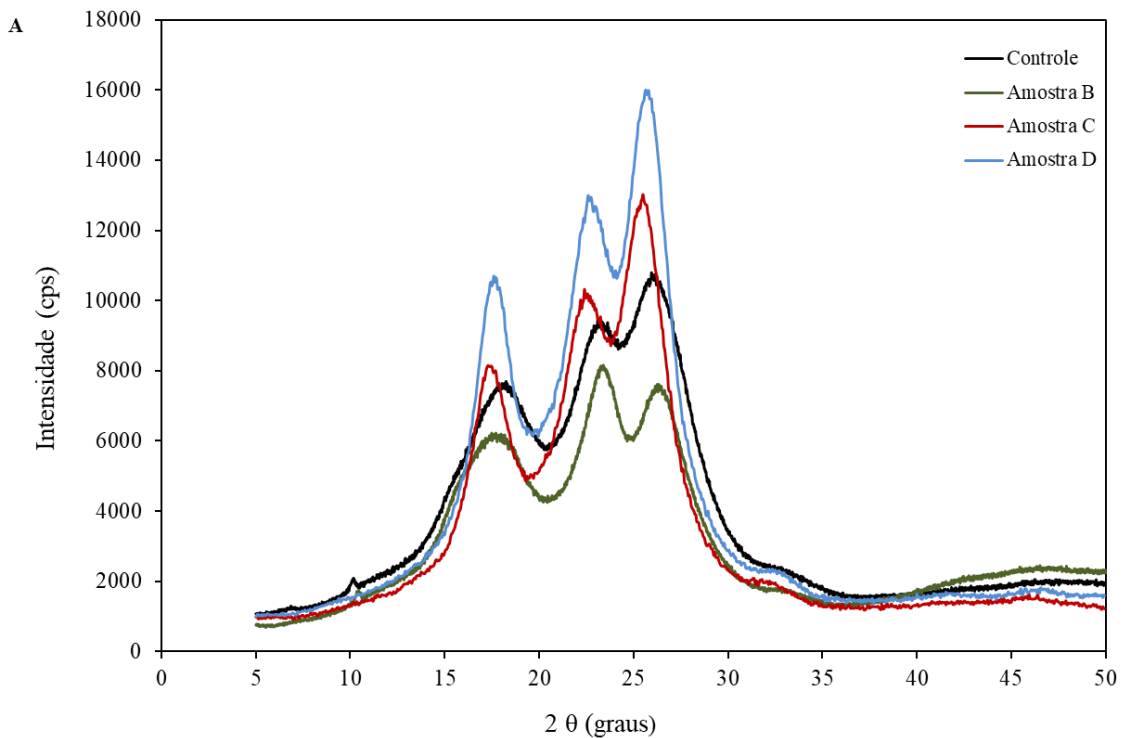
Os resultados indicam um comportamento térmico muito semelhante para as diferentes amostras, sendo que ocorreu a sobreposição das curvas. Foi observada uma única etapa de degradação térmica das amostras, que tem início em 350 °C e final em 485 °C, com temperatura da máxima taxa de degradação ocorrendo entre 437 e 439 °C. Nesta etapa, ocorre a despolimerização das cadeias do PET e a perda de massa total é de aproximadamente 80 %. Este resultado está de acordo com o observado na literatura (HU et al., 2020).

De forma geral, a análise de TGA permite analisar se houve mudança na estabilidade térmica da amostra, a qual poderia comprometer o processamento a elevadas temperaturas ou mesmo dar indícios de menor resistência à queima, no caso de redução da estabilidade. Os resultados evidenciam, portanto, que a utilização de proporções de até 60 % de fibra reciclada na composição, não altera o comportamento termogravimétrico dos nãotecidos.

### 4.3.6 Difração de raios X

O efeito das diferentes proporções na cristalinidade dos não tecidos pode ser visualizado nos difratogramas de raios X da Figura 25. Os mesmos padrões de difração são observados entre as diferentes amostras, mantendo os picos característicos do poliéster. No entanto, diferenças no índice de cristalinidade foram obtidas. Enquanto a amostra controle apresentou 20,3 % de cristalinidade, as amostras B, C e D apresentaram 32,38 %, 25,06 % e 33,02 %, respectivamente. O uso de fibra reciclada promove o aumento da cristalinidade, mas o aumento da proporção tende a modificar pouco essa característica.

Figura 25 - Difração de raios X para as amostras controle, B, C e D



### 4.4 DESEMPENHO DA FIBRA COMERCIAL TÉRMICA

Nesta etapa da pesquisa, foi avaliada a substituição de fibras da mistura controle por uma fibra térmica comercial, denominada HCS-3,3, nas proporções de 20 % (mistura E) e 40 % (mistura F). De acordo com o fabricante, a fibra térmica é produzida com dois polímeros

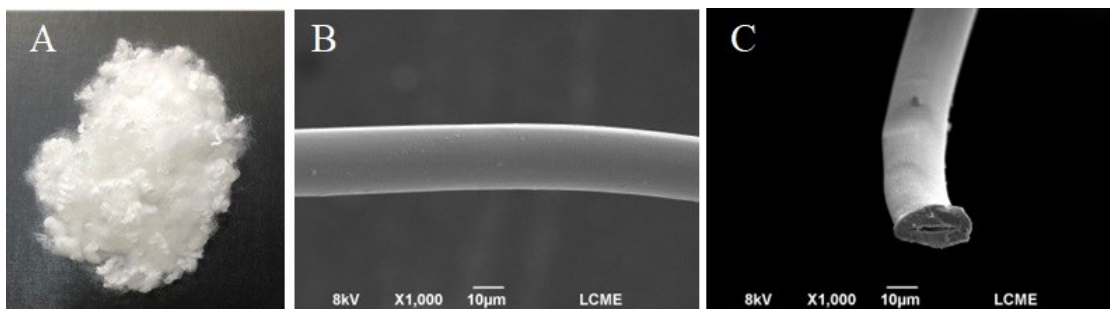
diferentes, polietileno tereftalato (PET) e o polítrimetileno tereftalato (PTT), e possui uma seção transversal oca siliconada, que contribui para um bom isolamento térmico (HUVIS, 2023).

#### 4.4.1 Caracterização da fibra térmica

##### 4.4.1.1 Aspecto macroscópico e microscópico

Na Figura 26 pode ser visualizado o aspecto macroscópico (a) e as imagens microscópicas de MEV da superfície (b) e da seção transversal (c) da fibra comercial térmica HCS-3,3.

Figura 26 – Imagem (a) e micrografias da superfície (b) e da seção transversal (c) da fibra HCS-3,3



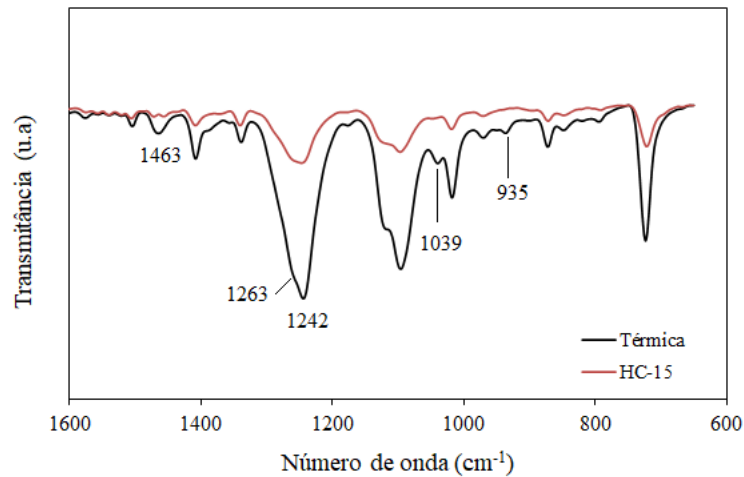
Fonte: Elaborado pelo autor

O aspecto macroscópico da fibra térmica é similar ao aspecto das demais fibras conjugadas, apresentando a ondulação característica deste tipo de fibra. A imagem de MEV apresentada na Figura 26 (b) indica uma superfície muito lisa e regular, típica dos polímeros sintéticos virgens. Já a microscopia da seção transversal Figura 26 (c) confirma a configuração oca da fibra. A microestrutura é homogênea, não apresentando indícios de separações de fase do silicone.

##### 4.4.1.2 FTIR

A composição química da fibra térmica HCS-3,3 foi avaliada por FTIR. Os espectros dessa fibra térmica e da fibra HC-15, utilizada para comparação, estão apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Espectros de FTIR da fibra térmica (HC-3,3) e da fibra HC-15.



Fonte: Elaborado pelo autor

A comparação dos espectros indica diferenças importantes entre as fibras. Enquanto a fibra HC-15 é constituída unicamente de PES, a fibra térmica é composta por uma blenda de dois tipos de poliéster, o PET e o PTT. A presença do PTT na fibra térmica é confirmada pela banda a  $1039\text{ cm}^{-1}$ , que corresponde ao estiramento C–C das três unidades de metileno (PICCININI; SENALDI; LOPES, 2014). Esta banda está ausente no espectro da fibra HC-15, que possui somente PES na composição. Outro indício da presença do PTT é a banda em  $1463\text{ cm}^{-1}$ , que se tornou bem evidente na fibra térmica e corresponde às vibrações de flexão do metileno.

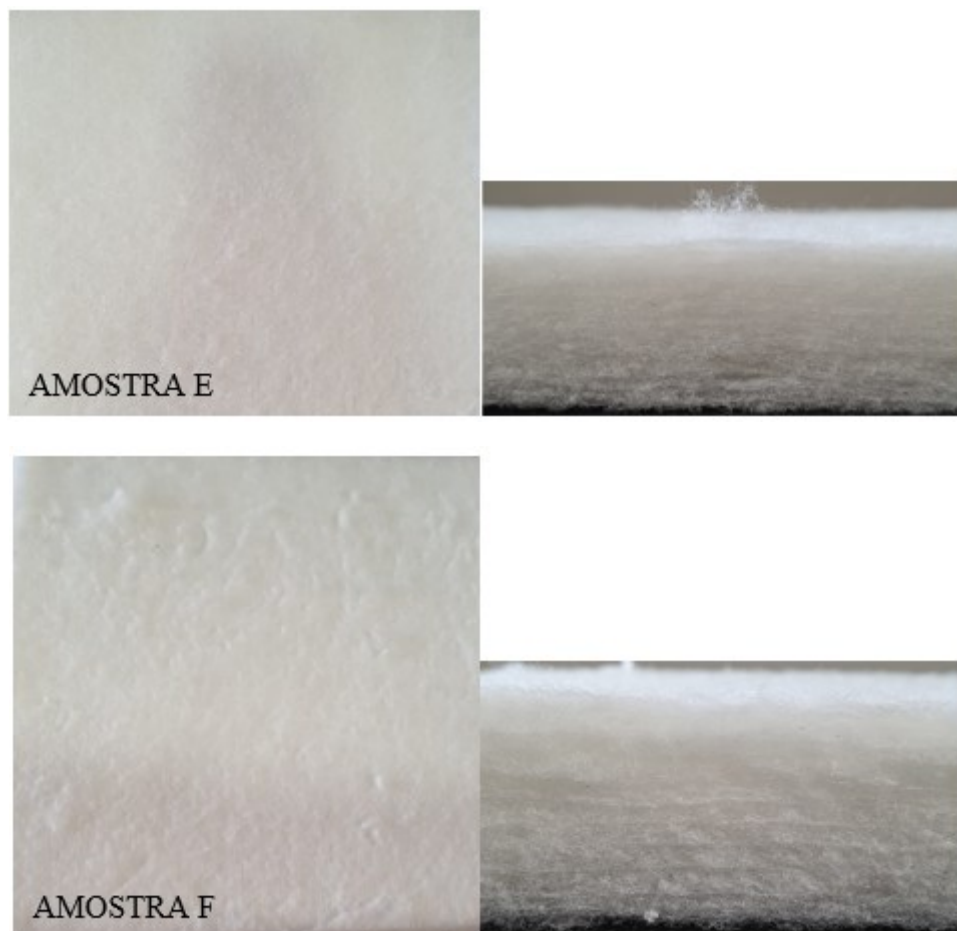
Petkova-Slipets, Zlateva e Staneva (2022) explicam que é difícil distinguir as principais faixas características do revestimento de silicone porque elas coincidem com as faixas do poliéster. De acordo com esses autores, a presença de  $\text{Si}-(\text{CH}_3)_3$  pode ser confirmada pelos picos de absorção em  $1263\text{ cm}^{-1}$ , que aparece no espectro como um ombro do pico com máximo em  $1242\text{ cm}^{-1}$ . O silicone também pode gerar uma banda de baixa intensidade em  $1044\text{ cm}^{-1}$  devido à conexão Si-O-Si. No entanto, esta região é muito próxima à banda de  $1039\text{ cm}^{-1}$ , de modo que pode ter havido sobreposição. De forma geral, a análise por FTIR confirmou que a fibra térmica apresenta uma composição química distinta das fibras utilizadas na etapa anterior desse estudo.

#### 4.4.2 Desenvolvimento de não tecido com a fibra térmica

##### 4.4.2.1 Aspecto macroscópico

O aspecto macroscópico das amostras de não tecido confeccionadas com 20 % (mistura E) e 40 % de fibra térmica está apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Aspecto macroscópico da superfície e seção transversal das amostras confeccionadas com 20 % (E) e 40 % (F) de fibra térmica.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao processo, foi observada uma maior dificuldade para a consolidação da estrutura, sendo que 40 % foi a máxima substituição possível de ser feita com essa fibra. Quando alterada a proporção de fibra térmica sem alteração da fibra Bi-4,4 responsável pela

consolidação, houve descolamento das camadas após a saída do forno, conforme mostra a Figura 29.

As causas da dificuldade da consolidação podem ser o baixo título direto da fibra térmica, que resultam em uma maior quantidade de fibra por metro quadrado e, também a presença do silicone que impede a consolidação entre as fibras deixando-as mais soltas, fazendo com que as camadas se descolem.

Figura 29 - Consolidação da amostra F



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4.2.2 Propriedades térmicas

As amostras de não-tecido produzidas com a fibra térmica foram avaliadas em relação à condutividade e resistência térmica e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Quantificação das propriedades térmicas das amostras E e F

<b>Amostra</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade Térmica (mW/m·K)</b>	<b>Resistência Térmica (m<sup>2</sup>·K/W)</b>
Controle	38,3	26,7	41,09 ± 0,78 <sup>a</sup>	0,933 ± 0,017 <sup>a</sup>
Amostra E	31,0	37,2	35,66 ± 0,58 <sup>b</sup>	0,896 ± 0,014 <sup>b</sup>
Amostra F	30,0	36,8	35,81 ± 0,69 <sup>b</sup>	0,837 ± 0,016 <sup>c</sup>

Letras iguais na mesma coluna indicam que não há diferença estatisticamente significativa pelo Teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os resultados indicam que a condutividade térmica da amostra foi significativamente reduzida nas amostras E e F em comparação com a amostra controle, mas entre as amostras com fibra térmica, não foi observada diferença significativa. Os valores da condutividade foram similares aos das amostras C e D, que continham 40 e 60 % de fibra reciclada. A resistência térmica foi reduzida significativamente com o aumento da proporção da fibra térmica na composição do nãotecido, o que pode ser atribuído à menor espessura da amostra.

Quando aumenta a quantidade de fibra com título direto mais fino, já se espera uma redução na espessura do material devido ao fato das fibras ficarem mais uniformes e não gerarem o suporte necessário para manter a espessura após o processo de consolidação. Assim como observado nas amostras com fibra reciclada, a utilização da fibra de menor título direto promoveu a redução da espessura e o aumento da densidade devido à redução da porosidade. A redução da condutividade térmica corrobora com a hipótese da literatura de que a transferência de calor é reduzida em matrizes com menos ar incluso. A resistência térmica, no entanto, foi reduzida devido à menor espessura. Considerando espessuras uniformes, a resistência aumentaria e o potencial de isolamento também.

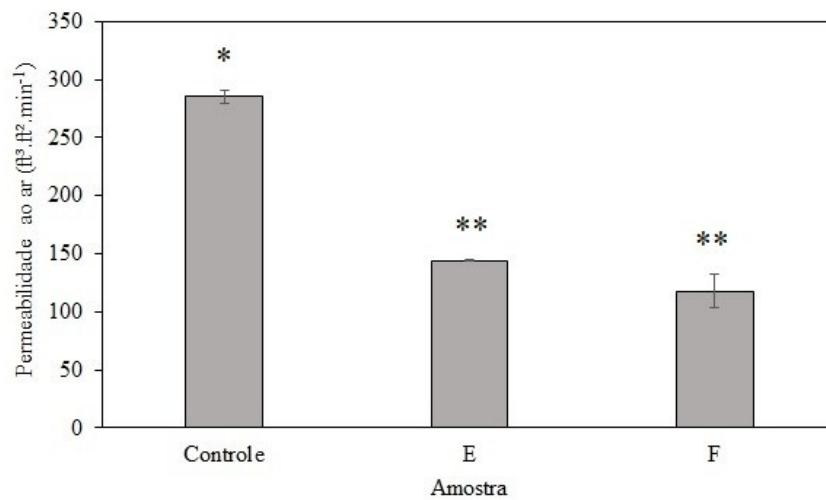
#### *4.4.2.3 Permeabilidade ao ar*

Os resultados de permeabilidade ao ar, apresentados na Figura 30, evidenciam uma redução significativa desta propriedade com o uso da fibra HCS. No entanto, não houve diferença significativa entre as diferentes proporções.

A amostra E, com 20 % de fibra térmica (HCS) apresentou permeabilidade ao ar cerca de 30 % mais baixa do que a amostra B, contendo 20 % de fibra reciclada de mesmo título. A fibra reciclada é sólida enquanto a fibra térmica (HCS) é oca. De acordo com Karaca, Omeroglu, Becerir (2012), as fibras ocas tendem a apresentar menor permeabilidade do que as fibras sólidas. No entanto, como a amostra controle é constituída somente por fibras ocas e apresenta a maior permeabilidade entre todas as amostras, pode-se inferir que a menor porosidade resultante do menor título direto das fibras tem a maior influência na permeabilidade ao ar. Embora tenham o mesmo título, a espessura da amostra E (31 mm) foi menor do que da amostra B (35,7 mm) devido aos problemas de consolidação destas estruturas em decorrência da presença de silicone na fibra. Desta forma, embora em pequena quantidade, a composição química da fibra apresentou uma influência na permeabilidade ao ar.

A associação dos resultados de condutividade térmica e da permeabilidade ao ar indicam que a amostra contendo 20 % de fibra HCS apresenta maior potencial de isolamento térmico dentre as amostras avaliadas. No entanto, problemas de consolidação e o descolamento das camadas podem limitar a sua aplicação.

Figura 30 – Permeabilidade ao ar para as amostras controle, E e F



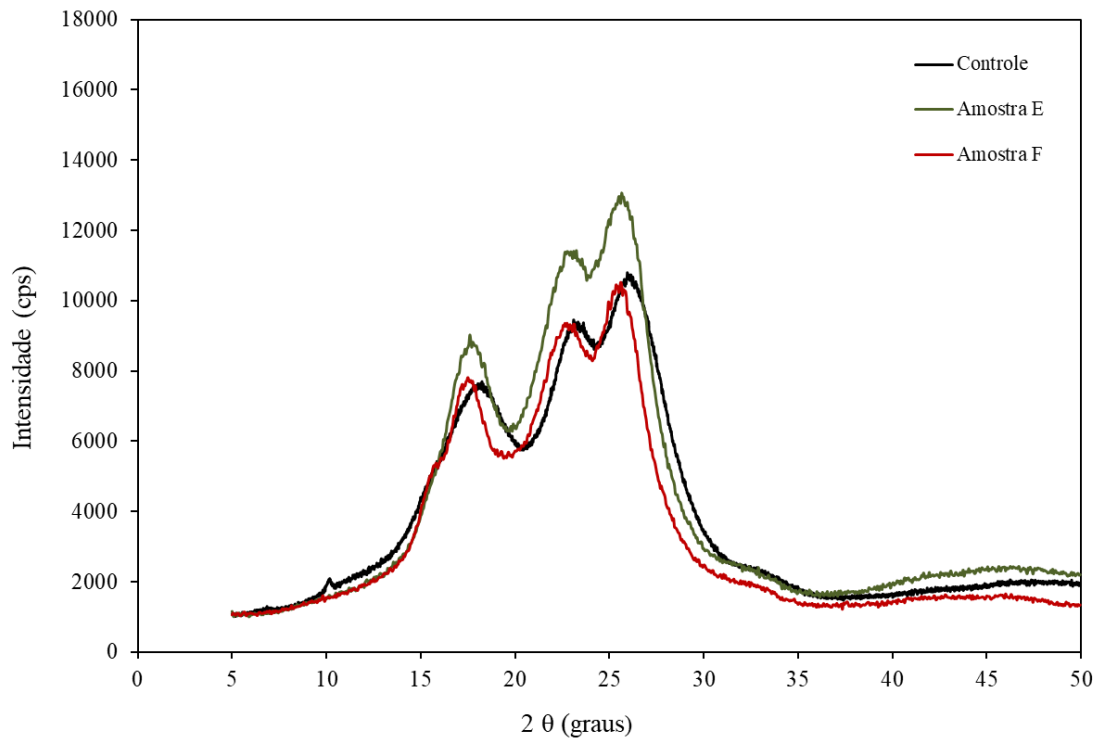
Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4.2.4 Difração de raios X

Os difratogramas de raios X dos não tecidos confeccionadas com a fibra HCS e sua comparação com a amostra controle estão apresentadas na Figura 31. Embora a análise de FTIR tenha evidenciado a presença de outros componentes na fibra, os padrões de difração mantiveram-se típicos do PET. O índice de cristalinidade manteve-se superior ao da amostra controle, mas semelhantes entre as duas proporções, sendo de 26,57 % para a amostra E e de 24,88 % para a amostra F. Os resultados obtidos se correlacionam bem com o observado para a permeabilidade ao ar.



Figura 31 – Difração de raios X para as amostras controle, E e F

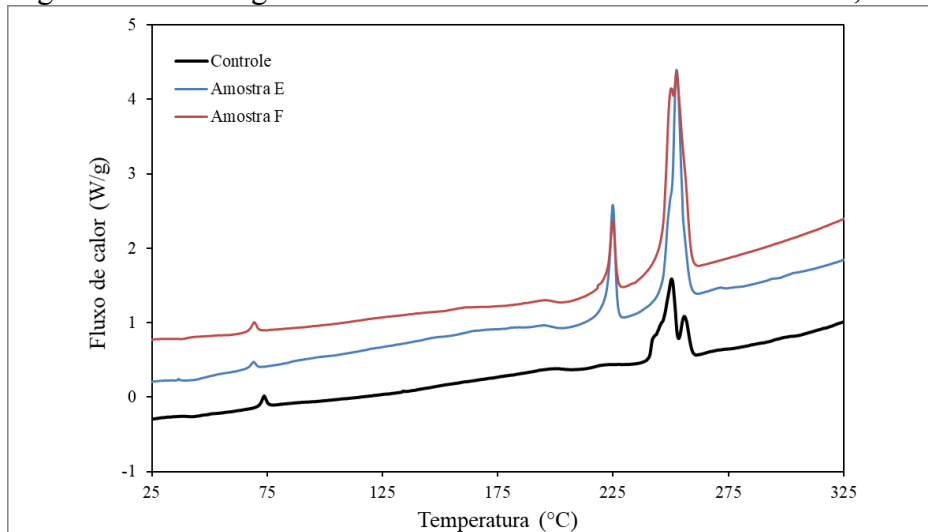


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4.2.5 DSC

A análise de DSC das amostras E e F evidenciou a diferença da composição das fibras nas amostras, conforme apresentado na Figura 32. Foram observados dois picos bem separados para essas amostras, na região de 225 °C e 250 °C. Esses picos são referentes ao ponto de fusão do PTT e do PET, respectivamente, ou seja, os polímeros que compõem a fibra HCS. A temperatura de transição vítrea apresentou um discreto deslocamento para valores inferiores com o aumento da proporção da fibra HCS na composição do não-tecido. De forma geral, verifica-se que a técnica de DSC tem sensibilidade para detectar mudanças na composição química das fibras nas amostras de não-tecido.

Figura 32 – Termogramas de fluxo de calor das amostras controle, E e F

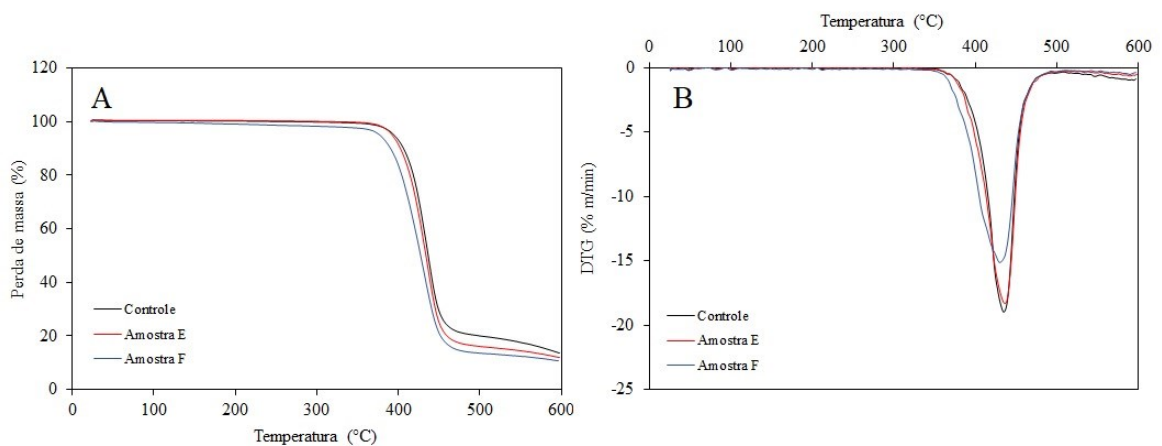


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4.2.6 Análise termogravimétrica

Assim como nas demais formulações, as amostras de nãotecido E e F foram analisadas por termogravimetria. As curvas de TG e DTG estão apresentadas na Figura 33 a e b, respectivamente.

Figura 33 – Análise termogravimétrica (a) e derivada da perda de massa (b) das amostras controle, E e F



Fonte: Elaborado pelo autor

Embora a fibra HCS seja constituída de dois polímeros, um único evento térmico foi observado, indicando a boa miscibilidade das fibras. A temperatura da máxima taxa de degradação foi de 435°C para a amostra E e de 431°C para a amostra F. A perda de massa

nesta etapa de degradação foi de 79 % para a amostra controle, 84 % para a amostra E e 86 % para a amostra F. Além da maior perda de massa, o resíduo a 600 °C foi ligeiramente maior para a amostra controle. A redução da temperatura de degradação, a maior perda de massa e o menor resíduo ao final do processo indicam a redução da estabilidade térmica das amostras, sobretudo a F em relação à amostra controle.

#### 4.4.3 Teste de queima

Uma importante propriedade dos materiais utilizados para isolamento térmico é a resistência ao fogo, uma vez que podem influenciar na segurança das edificações. Na Figura 34 apresenta-se o resultado do teste de queima para as diferentes amostras de não-tecido. Para as amostras controle, A, B, C e D, as fibras foram consumidas no local de contato com a chama. Não houve a continuação da queima nas amostras após a retirada da chama, indicando que o material é autoextinguível. Também não foram observadas fumaça e gotas de combustão. Já as amostras E e F foram inflamadas no momento da aplicação do fogo e desenvolvem uma combustão intensa (Figura 35) com duração de até 1min35s após sua remoção. A combustão também foi acompanhada por um intenso derretimento, emissão de fumaça e formação de muitas gotas líquidas de combustão. Esta diferença de comportamento pode ser atribuída à diferente composição química da fibra HCS, constituída por PET, PTT e silicone. O silicone, a depender do tipo, pode apresentar elevada inflamabilidade como no caso do silicone puro, que possui abundância em grupos Si-H.

A combustão de materiais poliméricos é um processo complexo envolvendo combinações simultâneas de calor e transferência/difusão de massa, dinâmica de fluidos e degradação química. Após a ignição, a combustão será autossustentada se o calor liberado pela chama for suficiente para manter a taxa de decomposição do polímero acima do necessário para manter a concentração do combustível volátil (DASARI, 2013). No caso da fibra térmica siliconada, a decomposição sob o calor envolveu a maior liberação de produtos combustíveis.

Para melhorar a resistência à chama de polímeros, acabamentos com aditivos inorgânicos, como os derivados da sílica, podem ser utilizados. Estes materiais apresentam baixa taxa de liberação de calor e podem formar camadas vítreas protetoras que resultam na dificuldade da propagação da chama. Petkova-Slipets, Zlateva e Staneva (2022), por exemplo, avaliaram as propriedades de não-tecidos de fibras de poliéster consolidadas por adesão

química utilizando poliacrilato ou termicamente. As estruturas com consolidação térmica continham um revestimento de silicone. Os autores observaram que ambas as amostras desenvolveram combustão, acompanhada de derretimento, fumaça e gotas líquidas. No entanto, o acabamento à base de silicone contribuiu para a proteção das fibras, interrompendo a combustão completa da amostra e limitando a liberação de gotas de combustão.

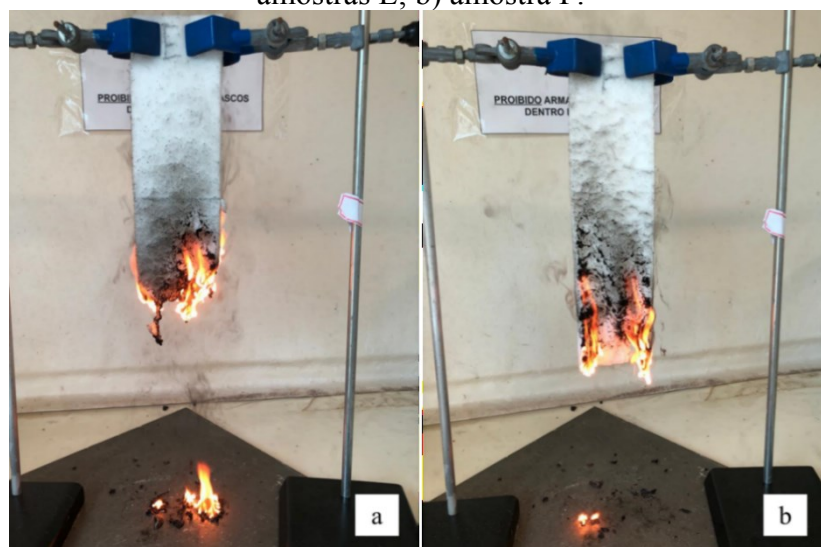
De forma geral, os resultados do teste de chama evidenciaram que a utilização da fibra HCS para a obtenção de nãotecidos, mesmo em uma proporção de 20 %, impacta negativamente no comportamento de queima do material.

Figura 34 – Resultados do teste de chama aplicado nas diferentes amostras de nãotecido.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 – Resultados do teste de chama aplicado nas diferentes amostras de nãotecido: a) amostras E; b) amostra F.



Fonte: Elaborado pelo autor

## 5 CONCLUSÕES

A partir deste estudo, pode-se concluir que a utilização de 20 % das fibras recicladas SR-1,4 e SR-3,3 não influenciou o processo de produção e a consolidação das camadas do não tecido e não houve diferença das propriedades de condutividade térmica e de resistência do não tecido. A permeabilidade ao ar para as amostras com fibra reciclada foi reduzida em quase 30 % em relação à amostra controle, o que pode ser atribuído às fibras mais finas que promovem o maior fechamento do material.

O aumento da proporção da fibra reciclada SR-3,3 para 40 % (amostra C) e 60 % (amostra D) aumentou a densidade do não tecido e reduziu significativamente a condutividade térmica dos não tecidos. A permeabilidade ao ar reduziu 47 % e 59 % para a amostra C e D, respectivamente, o que pode ser atribuído ao menor título direto da fibra reciclada, que reduz os poros da estrutura. As análises de DSC e TGA mostraram que a temperatura de fusão do não tecido ocorre em torno de 250 °C e a temperatura da máxima taxa de degradação é de aproximadamente 440 °C.

A fibra térmica siliconada (HCS-3,3) foi avaliada nas proporções de 20 % (mistura E) e 40 % (mistura F). Foram identificados problemas no processo de consolidação dos materiais quando alterado o percentual acima de 40 %, sendo que a presença de silicone deixa a fibra mais lisa, fazendo com que após a saída do forno as camadas se descolassem. Os resultados de condutividade térmica da amostra foram expressivamente reduzidos nas amostras E e F (36 mW/m·K) em comparação com a amostra controle (41mW/m·K), mas entre as diferentes proporções não foi observada diferença significativa. Em conjunto com os dados de permeabilidade ao ar, amostras de não tecidos com a fibra HCS mostram potencial para isolamento térmico, mas problemas de consolidação são um fator limitante.

No teste de queima foi observado que as amostras controle, A, B, C e D tiveram a queima somente no local de contato com a chama, não havendo a continuação da queima após a retirada da chama. O material teve apenas a retração, sem gotejamento e sem fumaça, indicando que o material é autoextinguível. Quando efetuado o mesmo teste com as amostras E e F, estas foram inflamadas no momento da aplicação do fogo e desenvolvem uma combustão intensa, consumindo praticamente toda a amostra. Mesmo sendo considerada uma fibra térmica, esta apresentou um alto grau de inflamabilidade devido à presença de silicone, não sendo, portanto, indicada para a utilização para isolamento térmico.

Levando em consideração o processo de produção as propriedades térmicas e características de queima, pode-se concluir que a fibra a SR- 3,3, em proporções de até 40 %, apresentam maior potencial para utilização na composição de não tecido para isolante térmico. A substituição da fibra virgem pela fibra reciclada contribui para diminuição da poluição ambiental, do consumo de energia e redução do custo da matéria-prima dos não tecidos, garantindo ainda eficiência durante a sua utilização como isolante térmico.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

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

- i. Avaliar substituição de fibra reciclada SR-3,3 em 30%.
- ii. Avaliar aumento da proporção fibra bicomponente BI-4,4 para melhorar a consolidação.
- iii. Avaliar a resistência com teste de tração.

## REFERÊNCIAS

ADITYA, Lisa et al. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1352-1365, 2017

ANH, Le Duong Hung; PÁSZTORY, Zoltán. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102604, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102604>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÕES - ABIT. **Produção e crescimento da indústria de não tecidos**. 2013. Disponível em: <https://www.abit.org.br/home>. Acesso em: 12 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 11752:2016**: Materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e refrigeração industrial - Especificação. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 38 p. Acesso em: 12 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR 13462:1995**: Tecidos de malhas com trama – Estruturas fundamentais. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 16 p. Acesso em: 12 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12546**: Materiais Têxteis – Ligamentos fundamentais de tecidos planos - Terminologia. 1 ed. Rio de Janeiro, 2017b. Acesso em: 12 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13370:2017** Não tecido - Terminologia. 1 ed. Rio de Janeiro, 2017a. 18p. Acesso em: 12 fev. 2022.

ATAKAN, Raziye; SEZER, Serdar; KARAKAS, Hale. Development of nonwoven automotive carpets made of recycled PET fibers with improved abrasion resistance. **Journal of Industrial Textiles**, v. 49, n. 7, p. 835-857, 2020.

AULIN, Christian; GÄLLSTEDT, Mikael; LINDSTRÖM, Tom. Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings. **Cellulose**, v. 17, p. 559-574, 2010.

BACCOUCH, Wafa et al. Investigation of the mechanical, thermal, and acoustical behaviors of cotton, polyester, and cotton/polyester nonwoven wastes reinforced epoxy composites. **Journal of Industrial Textiles**, v. 51, n. 6, p. 876-899, 2022.

BOZSAKY, Dávid. The historical development of thermal insulation materials. **Periodica Polytechnica Architecture**. Barcelona, v. 41, p. 49-56. 2010.  
<https://doi.org/10.3311/pp.ar.2010-2.02>

CELIK, Yasemin; SHAMSUYEVA, Madina; ENDRES, Hans Josef. Thermal and mechanical properties of the recycled and virgin PET—part I. **Polymers**, v. 14, n. 7, p. 1326, 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de massa e de calor uma abordagem prática**. 4. ed. Rio de Janeiro: Amgh, 2012. 416 p.

CERKEZ, I.; KOCER, H. B.; BROUGHTON, R. M.. Airlaid nonwoven panels for use as structural thermal insulation. **The Journal of the Textile Institute**, v. 109, n. 1, p. 17-23, 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/00405000.2017.1320815>.

CHAI, Bo; TUSHAR, Wayes; HASSAN, Naveed Ul; YUEN, Chau; YANG, Zaiyue. Managing energy consumption in buildings through offline and online control of HVAC systems. **Ieee Region 10 Conference (Tencon)**, p. 325-329, 2016.  
<http://dx.doi.org/10.1109/tencon.2016.7848677>.

COSTA, Maria Izabel. **Transformação do nãotecido - uma abordagem do design têxtil em produtos de moda**. 2003. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade do Oeste de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.



CUMBI, H. A. **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob diferentes esforços solicitantes**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

DASARI, Aravind et al. Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. **Progress in Polymer Science**, v. 38, n. 9, p. 1357-1387, 2013.

DISSANAYAKE, D. G. K. et al. Developing a compression moulded thermal insulation panel using postindustrial textile waste. **Waste Management**, v. 79, p. 356-361, 2018.

DROCHYTKA, Rostislav; DVORAKOVA, Michaela; HODNA, Jana. Performance evaluation and research of alternative thermal insulation based on waste polyester fibers. **Procedia engineering**, v. 195, p. 236-243, 2017.

DU, Ning; FAN, Jintu; WU, Huijun. Optimum porosity of fibrous porous materials for thermal insulation. **Fibers and Polymers**, v. 9, n. 1, p. 27-33, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-008-0005-5>

EDANA. **How are nonwovens made?** 2022. Disponível em: <https://www.edana.org/nw-related-industry/how-are-nonwovens-made>. Acesso em: 12 mar. 2022.

FENG, Yue; SHEN, Jiesheng; LIU, Xingzuo; ZHAO, Yue; LIANG, Xiaoyan; HUANG, Jian; MIN, Jiahua; WANG, Linjun; SHI, Weimin. The preparation and optical properties of Ag and Ag/ZnO composite structure. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 79, n. 1, p. 98-106, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s10971-016-4023-2>.

FU, Shao-Yun; MAI, Yiu-Wing. Thermal conductivity of misaligned short-fiber-reinforced polymer composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 88, n. 6, p. 1497-1505, 2003. <http://dx.doi.org/10.1002/app.11864>.

GABARDO, Rafaela Stefanie et al. Surface modification of polyester fabrics by ozone and its effect on coloration using disperse dyes. **Materials**, v. 14, n. 13, p. 3492, 2021.

GIBSON, Phillip W.; LEE, Calvin; KO, Frank; RENEKER, Darrell. Application of Nanofiber Technology to Nonwoven Thermal Insulation. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 2, n. 2, p. 155892500700200, 2007. <http://dx.doi.org/10.1177/155892500700200204>.

GNIP, Ivan; VĚJELIS, Sigitas; VAITKUS, Saulius. Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10 C and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50 C. **Energy and Buildings**, v. 52, p. 107-111, 2012.

GOYAL, Siddharth; INGLEBY, Herbert A.; BAROOAH, Prabir. Occupancy-based zone-climate control for energy-efficient buildings: complexity vs. performance. **Applied Energy**, v. 106, p. 209-221, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.039>.

GRISHANOV, S. Structure and properties of textile materials. In: CLARK, M.. **Handbook of Textile and Industrial Dyeing: principles, processes and types of dyes**. Eua: Woodhead Publishing, 2011. p. 18-26.

GUO, Zengwei et al. Development of Circularly Recyclable Low Melting Temperature Bicomponent Fibers toward a Sustainable Nonwoven Application. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 49, p. 16778-16785, 2021.

HADDED, Abderrazak; BENLTOUFA, Sofien; FAYALA, Faten; JEMNI, Abdelmajid. Thermo physical characterisation of recycled textile materials used for building insulating. **Journal of Building Engineering**, v. 5, p. 34-40, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.10.007>.

HALL, M. R. Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings. Elsevier. Canadá. 2010, 389p.

HE, Shan-Shan; WEI, Meng-Yuan; LIU, Min-Hua; XUE, Wen-Liang. Characterization of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) (PET) fibers. **The Journal of the Textile Institute**, v. 106, n. 8, p. 800-806, 2014. <http://dx.doi.org/10.1080/00405000.2014.944820>.

HEGYI, Andreea; VERMEŞAN, Horaţiu; LăZĂRESCU, Adrian-Victor; PETCU, Cristian; BULACU, Cezar. Thermal Insulation Mattresses Based on Textile Waste and Recycled

Plastic Waste Fibres, Integrating Natural Fibres of Vegetable or Animal Origin. **Materials**, v. 15, n. 4, p. 1348, 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15041348>.

HU, Yuanchao et al. Synthesis of poly (ethylene terephthalate) based on glycolysis of waste PET fiber. **Journal of Macromolecular Science, Part A**, v. 57, n. 6, p. 430-438, 2020.

HUANG, Congliang; QIAN, Xin; YANG, Ronggui. Thermal conductivity of polymers and polymer nanocomposites. **Materials Science and Engineering: R**, v. 132, p. 1-22, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.002>.

HUANG, Yu; NIU, Jian-Lei; CHUNG, Tse-Ming. Study on performance of energy-efficient retrofitting measures on commercial building external walls in cooling-dominant cities. **Applied Energy**, v. 103, p. 97-108, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.003>.

HUVIS. Disponível em:

[https://www.huvis.com/eng/product/ProductDetail.asp?product\\_seq=213&cate\\_seq=1400&cate2\\_seq=1401](https://www.huvis.com/eng/product/ProductDetail.asp?product_seq=213&cate_seq=1400&cate2_seq=1401)

INCROPERA, F. P.; DEWITT, P.D.; BERGMAN, L.T.; LAVINE, A.S.; QUEIROZ, E.M.; PESSOA, F.L.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730:2005**: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva, 2005.

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**, v. 16, n. 4, p. 306-315, 2011.

JABBAR, Abdul; ALI, Muhammad Affan; SHAHZAD, Amir; NAEEM, Muhammad Salman; JAVED, Zafar; QADIR, Muhammad Bilal; REHMAN, Khalil; IRFAN, Muhammad; AHMAD, Zuhaib. Development of Kapok/Recycled-PET Blended Needle-Punched Thermal Waddings. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 3, p. 1024-1032, 2020. <http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2020.1784816>.

KALEBEK, Nazan Avcioglu; BABAARSLAN, Osman. **Fiber selection for the production of nonwovens**. InTech, 2016.

KARACA, Esra; OMEROGLU, Sunay; BECERIR, Behcet. Effects of fiber cross-sectional shapes on tensile and tearing properties of polyester woven fabrics. **Textile and Apparel**, v. 25, n. 4, p. 313-318, 2015.

KAYNAKLI, Omer. A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 415-425, 2012.

KLEIN, Sanford; NELLIS, Gregorry. **Thermodynamics**. 2. ed. Eua: Cambridge University Press, 2009. 321 p.

KORU, Murat. Determination of thermal conductivity of closed-cell insulation materials that depend on temperature and density. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 41, p. 4337-4346, 2016.

KREITH, F.; MANGLIK, R.M. Principles of heat transfer. 8 Ed. Cengage Learning. Austrália. 2016.432p.

KUMAR N, Muthu; V, Vinoth. Development of needle punched Nonwovens from natural fiber waste for thermal insulation application. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 14, p. 9580-9588, 2022

KUMAR, N. Muthu; THILAGAVATHI, G.; KARTHIKKA, M. Development of Recycled PET/comber Noil Nonwovens for Thermal Insulation Application. **Journal Of Natural Fibers**, p. 1-8, 2020. <http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2020.1841064>.

LEAN, Hooi Hooi; SMYTH, Russell. CO2 emissions, electricity consumption and output in ASEAN. **Applied Energy**, v. 87, n. 6, p. 1858-1864, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.003>.

LIU, Yatao et al. Lamellar and fibrillar structure evolution of poly (ethylene terephthalate) fiber in thermal annealing. **Polymer**, v. 105, p. 157-166, 2016.

MAJUMDAR, Abhijit; SHUKLA, Sandeep; SINGH, Anshu Anjali; ARORA, Sanchi. Circular fashion: properties of fabrics made from mechanically recycled poly-ethylene terephthalate (pet) bottles. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 161, p. 104915, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104915>.

MARINAKIS, Vangelis; DOUKAS, Haris; KARAKOSTA, Charikleia; PSARRAS, John. An integrated system for buildings' energy-efficient automation: application in the tertiary sector. **Applied Energy**, v. 101, p. 6-14, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.032>.

MARINHO, Maria Augusta do Rosário da Silva Roleira. **Estruturas têxteis de elevado isolamento térmico para condições extremas de frio**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Minho, 2013.

MELGAR, Sergio Gómez; MÁRQUEZ, José Manuel Andújar. New Research Trends and Topics for Achieving Energy Efficiency in Buildings: both new and rehabilitated. **Energies**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 851, 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/en15030851>.

MOCHIZUKI, Masatsugu; MATSUNAGA, Nobuhiro. Bicomponent polyester fibers for nonwovens. In: The Society of Fiber Science and Techno, J. (eds) High-Performance and Specialty Fibers. Springer, Tóquio, 2016. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-55203-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-4-431-55203-1_25)

MOKWENA, K. Khanah; TANG, Juming. Ethylene vinyl alcohol: a review of barrier properties for packaging shelf stable foods. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 52, n. 7, p. 640-650, 2012.

MOSAVI-MIRKOLAEI, Seyyede Tahereh; NAJAFI, Saeed Kazemi; TAJVIDI, Mehdi. Physical and mechanical properties of wood-plastic composites made with microfibrillar blends of LDPE, HDPE and PET. **Fibers and Polymers**, v. 20, p. 2156-2165, 2019.

NAEIMIRAD, Mohammadreza et al. Recent advances in core/shell bicomponent fibers and nanofibers: A review. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 135, n. 21, p. 46265, 2018.

NR 7. **NR 17 - ERGONOMIA**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 18 p.

OZTURK, M. Kucukali; NERGIS, B.; CANDAN, C. A comparative study on air permeability properties of multilayered nonwoven structures. **International Journal of Materials and Metallurgical Engineering**, v. 10, n. 12, p. 1510-1513, 2017.

PAPADOPOULOS, Agis M. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 1, p. 77-86, 2005.

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**, v. 92, p. 161-169, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.056>.

PAUL, Heather L.; DILLER, Kenneth R. Comparison of Thermal Insulation Performance of Fibrous Materials for the Advanced Space Suit. **Journal of Biomechanical Engineering**, v. 125, n. 5, p. 639-647, 2003. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1611885>.

PETKOVA-SLIPETS, Rositsa; ZLATEVA, Penka; STANEVA, Desislava. Influence of the polyester non-wovens production type on their thermal and flammability properties. **Journal of Engineering and Applied Science**, v. 69, n. 1, p. 1-13, 2022.

PICCININNI, Paola; SENALDI, Chiara; LOPES, João. F. A. **Fibre labelling. Polytrimethylene terephthalate - PTT**. DuPont: Final report. EUR 26564. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2014. Disponível em: <https://>

op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/213eb004-e91c-4ec7-971c-de10d448cbaa/language-em. Acesso em: 15 fev. 2023.

RABBAT, Christelle; AWAD, Sary; VILLOT, Audrey; ROLLET, Delphine; ANDRÈS, Yves. Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings: current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 156, p. 111962, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111962>.

ROSA, Eduardo. V. da; OLIVERA, Fernando. R.; SANTOS, I. F. D. dos; STEFFENS, Fernanda. Potential use of nonwoven for acoustic absorption/ Uso potencial de não-tecidos para absorção acústica. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 20582–20598, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-618>

RUSSELL, S J. **Handbook of Nonwovens**: a volume in woodhead publishing series in textiles. Canadá: Woodhead Publishing, 2007. 389 p.

SAKTHIVEL, Santhanam; KUMAR, Selvaraj Senthil; MEKONNEN, Seblework; SOLOMON, Eshetu. Thermal and sound insulation properties of recycled cotton/polyester chemical bonded nonwovens. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 15, p. 155892502096881, 2020. <http://dx.doi.org/10.1177/1558925020968819>.

SENAI MIX. **Senai Mix Design. Verão**. Brasília: Senai-SP, 2017. 376 p.

SHAO, Dongfeng; WEI, Qufu. Microwave-Assisted Rapid Preparation of Nano-ZnO/Ag Composite Functionalized Polyester Nonwoven Membrane for Improving Its UV Shielding and Antibacterial Properties. **Materials**, v. 11, n. 8, p. 1412, 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/ma11081412>.

SILVA, Manuel António Pinto da. **Metodologia para a definição exigencial de isolantes térmicos**. Porto Alegre: Fgh, 1996. 108 p.

SINCLAIR, Rose. Understanding textile fibres and their properties: What is a textile fibre? In: SINCLAIR, Rose. **Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology**. 126. ed. São Francisco: Woodhead Publishing, 2008. p. 8-38.

TALEGHANI, Mohammad; TENPIERIK, Martin; KURVERS, Stanley; DOBBELSTEEN, Andy van Den. A review into thermal comfort in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 201-215, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.050>.

TORREIRA, Raul Peragallo. **Isolamento térmico: frio e calor**. São Paulo: Fet, 1980. 89 p.

VARKIYANI, S.M Hosseini; RAHIMZADEH, H; BAFEKRPOOR, H; JEDDI, Ali A.A. Influence of punch density and fiber blends on thermal conductivity on nonwoven. **The Open Textile Journal**, [s. l], n. 4, p. 1-6, 2011.

VELOSO, Mário V. V.; SILVA, Fabrício M. Energia renovável: Desenvolvimento ambiental sustentável. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 14, pág. e08111432467-e08111432467, 2022.

WANG, Moran; HE, Jihuan; YU, Jianyong; PAN, Ning. Lattice Boltzmann modeling of the effective thermal conductivity for fibrous materials. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 46, n. 9, p. 848-855, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.11.006>.

WAZNA, Mohamed El; FATIHI, Mohamed El; BOUARI, Abdeslam El; CHERKAOUI, Omar. Thermo physical characterization of sustainable insulation materials made from textile waste. **Journal of Building Engineering**, v. 12, p. 196-201, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.06.008>.

WAZNA, Mohamed El; GOUNNI, Ayoub; BOUARI, Abdeslam El; ALAMI, Mustapha El; CHERKAOUI, Omar. Development, characterization and thermal performance of insulating nonwoven fabrics made from textile waste. **Journal of Industrial Textiles**, v. 48, n. 7, p. 1167-1183, 2019. <http://dx.doi.org/10.1177/1528083718757526>.



XUE, Ye; LOFLAND, Samuel; HU, Xiao. Thermal conductivity of protein-based materials: a review. **Polymers**, v. 11, n. 3, p. 456, 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/polym11030456>.

YACHMENEV, Val G; BERTONIERE, Noelie R; BLANCHARD, Eugene J. Intensification of the bio-processing of cotton textiles by combined enzyme/ultrasound treatment. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 77, n. 5, p. 559-567, 2002. <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.579>.

YANG, Liu; YAN, Haiyan; LAM, Joseph C. Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. **Applied Energy**, v. 115, p. 164-173, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>.

YANG, Tao; XIONG, Xiaoman; PETRŮ, Michal; TAN, Xiaodong; KANEKO, Hiroki; MILITKÝ, Jiří; SAKUMA, Atsushi. Theoretical and experimental studies on thermal properties of polyester nonwoven fibrous material. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 12, p. 2882, 26 jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13122882>.

YAO, Runming; ZHANG, Shaoxing; DU, Chenqiu; SCHWEIKER, Marcel; HODDER, Simon; OLESEN, Bjarne W.; TOFTUM, Jørn; D'AMBROSIO, Francesca Romana; GEBHARDT, Hansjürgen; ZHOU, Shan. Evolution and performance analysis of adaptive thermal comfort models – A comprehensive literature review. **Building and Environment**, v. 217, p. 109020, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109020>.

YOKESWARAN, R.; CHANDRAN, Siva S.; KUMAR, Satish, V.; LOGANATHAN, M.; VELUCHAMY, B. Influence of different insulation materials for effective cooling performance. **Materials Today: Proceedings**, v. 69, p. 967-973, 2022.

YUAN, Feng; YAO, Runming; SADRIZADEH, Sasan; LI, Baiyi; CAO, Guangyu; ZHANG, Shaoxing; ZHOU, Shan; LIU, Hong; BOGDAN, Anna; CROITORU, Cristiana. Thermal comfort in hospital buildings – A literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103463, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103463>.

ZHAI, Yijie; BAI, Yueyang; WU, Zhen; HONG, Jinglan; SHEN, Xiaoxu; XIE, Fei; LI, Xiangzhi. Grain self-sufficiency versus environmental stress: an integration of system dynamics and life cycle assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, p. 112153, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112153>.

ZHU, Guocheng; KREMENAKOVA, Dana; WANG, Yan; MILITK, Jiri. Air permeability of polyester nonwoven fabrics. **Autex Research Journal**, v. 15, n. 1, p. 8-12, 2015.