

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
CAMPUS SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**

José Rodolfo Vieira Leite

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/NÃO  
TECIDO UTILIZANDO REFUGO DA INDÚSTRIA DE NÃO TECIDO**

São José dos Campos - SP

2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
CAMPUS SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/NÃO  
TECIDO UTILIZANDO REFUGO DA INDÚSTRIA DE NÃO TECIDO**

José Rodolfo Vieira Leite

Dissertação apresentada à Universidade Federal de São Paulo como requisito à obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS, área de concentração: Engenharia e Ciências de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Roberto Passador

São José dos Campos - SP

2016

**Leite, José R. V.**

Desenvolvimento de compósitos de resina epóxi/não tecido utilizando refugo da indústria de não tecido / José Rodolfo Vieira Leite - 2015.  
106f.

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2013.  
Orientação: Fábio Roberto Passador.

1. Compósitos. 2. Matriz termorrígida 3. Compósitos epóxi/não tecido. I. Fábio Roberto Passador II. Desenvolvimento de compósitos de resina epóxi/não tecido utilizando refugo da indústria de não tecido para aplicação na área de engenharia de compósitos.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO**

José Rodolfo Vieira Leite

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/NÃO TECIDO  
UTILIZANDO REFUGO DA INDÚSTRIA DE NÃO TECIDO.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de São Paulo como requisito à obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS, área de concentração: Engenharia e Ciências de Materiais.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Fábio Roberto Passador (Orientador)  
Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Paula Lemes  
Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliandra de Sousa Trichês  
Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP

---

Prof. Dr. Juliano Marini  
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar



## **DEDICATÓRIA**

Ao Pai, ao Filho e ao Espírito Santo,

À minha esposa Rosangela e filha LayslaRichelly,

Aos meus pais José Leite e Rosângela Vieira,

Aos meus colegas do curso,

Amigos, inimigos e a todos que tem me assistido

Direta ou indiretamente com amor,

Apoio e compreensão.

## **VITAE DO CANDIDATO**

Bacharel em Química pela Universidade do Vale do Paraíba (2012)



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Jesus Cristo por me dar discernimento e permitir alcançar meus objetivos.

Ao Prof. Dr. Fábio Roberto Passador pela orientação, confiança, paciência e companheirismo ímpar para concretização deste trabalho.

À Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), ao Instituto de Ciência e Tecnologia, ao Departamento de Ciência e Tecnologia e PPG-ECM, pelo investimento na qualificação de seus discentes.

A Freudenberg Performance Materials pela doação dos não tecidos.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mirabel Cerqueira Rezende por ceder gentilmente a resina epóxi.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Amanda Dantas de Oliveira, a MsC. Thais Montanheiro e a Laís Nagaki pelos auxílios nas medidas experimentais.

"Um pouco de ciência nos afasta de Deus. Muito, nos aproxima."

**Louis Pasteur**

X

## RESUMO

Não tecidos são formados por processos de extrusão e podem ser produzidos de forma econômica onde são utilizados em produtos descartáveis. Os setores de embalagem e médico hospitalares são os maiores consumidores de produtos a base de não tecidos. A indústria de não tecido gera uma grande quantidade de resíduo sólido proveniente da produção, sendo constituído de fibras de diversos polímeros, entre os quais se destacam a poliamida, polietileno, polipropileno, poliéster e poliestireno. Esses materiais possuem potencial para serem utilizados como agente de reforço de matrizes termofixas, contribuindo para uma melhora nas propriedades mecânicas dessas matrizes e ainda colaborando com a diminuição do resíduo sólido da indústria de não tecido. Neste trabalho foram preparados compósitos de matriz de resina epóxi com dois tipos diferentes de não tecidos oriundos do descarte de indústrias da região do Vale do Paraíba. Os compósitos foram preparados através de moldagem manual e foram caracterizados quanto às propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas. A adição de 0,6 e 1,2 pcr de fibras de não tecidos de PE/PP aumentou a temperatura de transição vítrea da resina epóxi no compósito, além de melhorar as propriedades mecânicas, evidenciada pelo aumento no módulo elástico e no módulo de flexão dos compósitos de matriz epoxídica. Para compósitos de resina epóxi reforçados com laminados de não tecido de PE/PP/PET, em que os laminados possuíam uma direção preferencial das fibras, decorrentes do processo de consolidação desses laminados, o sentido da adição desse tipo de material para confecção dos compósitos afetou as propriedades mecânicas do compósito. Compósitos com laminados dispostos no sentido longitudinal ao sentido de consolidação apresentaram propriedades mecânicas superiores. Assim, os resíduos da indústria de não tecidos podem ser utilizados como agentes de reforço para compósitos de matriz de resina epóxi e pode ser uma alternativa para diminuição da quantidade de descarte desse produto, utilizando-se de uma metodologia simples e de baixo custo.



## **ABSTRACT**

### **DEVELOPMENT OF EPOXY/NON-WOVEN COMPOSITES USING WASTE OF NON-WOVEN INDUSTRY**

Non-wovens are formed by extrusion processes and may be produced in an economical manner which are used in disposable products. Medical and hospital sector and packaging sectors are the largest consumers of non-wovens. The non-woven industry generates a large content of solid waste from the production. The wastes of non-woven are fibers of various polymers, including polyamide, polyethylene, polypropylene, polyester and polystyrene. These materials have great interest for use as a reinforcing agent in thermosetting matrix, contributing to an improvement in the mechanical properties of these matrices, and also collaborating with the decrease of the solid residue of the non-woven industry. In this work, epoxy/non-woven composites were prepared using two different types of waste of non-wovens supplied from Paraíba's Valley industries. The composites were prepared by hand lay-up technique and characterized by thermal, mechanical and morphological properties. The addition of 0.6 to 1.2 phr of fibers of PE/PP non-woven increased the glass transition temperature of the epoxy resin in the composite, besides improving the mechanical properties, as evidenced by the increase in elastic modulus and flexural modulus of the composites. For composite reinforced with laminated of PE/PP/PET non-woven, which presents a preferred direction of the fibers, resulting from the consolidation of these laminates, the mechanical properties of the composite are influenced by the direction of the fibers. Composites with laminates arranged longitudinally to the direction of consolidation had superior mechanical properties. Thus, residues of the non-woven industry can be used as fillers for preparation of composites materials and can be an alternative for decreasing the amount of discharge of the product, using a low cost and simple method.



## **PUBLICAÇÕES**

- LEITE, J.R.V.; PASSADOR, F.R. Avaliação das propriedades térmicas de compósitos de resina epóxi/não tecido. In: 3º SiCEMat - Simpósio de Ciência e Engenharia de Materiais. São José dos Campos – SP. Outubro, 2015.



## SUMARIO

|                                                                                                                   |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>AGRADECIMENTOS .....</b>                                                                                       | <b>IX</b>   |
| <b>RESUMO .....</b>                                                                                               | <b>XI</b>   |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                                                                              | <b>XIII</b> |
| <b>PUBLICAÇÕES .....</b>                                                                                          | <b>XV</b>   |
| <b>SUMARIO .....</b>                                                                                              | <b>XVII</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>                                                                                     | <b>XIX</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>                                                                                    | <b>XXI</b>  |
| <b>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....</b>                                                                              | <b>XXV</b>  |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                         | <b>1</b>    |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                                                                                     | 1           |
| 1.2 OBJETIVOS.....                                                                                                | 3           |
| <b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                        | <b>5</b>    |
| 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....                                                                                     | 5           |
| 2.2 MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DE COMPÓSITOS .....                                                                     | 8           |
| 2.3 COMPÓSITOS ESTRUTURAIS .....                                                                                  | 10          |
| 2.4 RESINA EPÓXI.....                                                                                             | 12          |
| 2.5 NÃO TECIDO .....                                                                                              | 15          |
| 2.5.1 <i>Classificação dos não tecidos</i> .....                                                                  | 16          |
| 2.6 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE NÃO TECIDOS .....                                                                      | 16          |
| 2.6.1 <i>Abridor de fardos</i> .....                                                                              | 16          |
| 2.6.2 <i>Cardagem (Formação da manta)</i> .....                                                                   | 17          |
| 2.6.3 <i>Consolidação da Manta</i> .....                                                                          | 18          |
| 2.6.4 <i>Transformação, Acabamento e/ou Conversão do não tecido (Fabric</i><br><i>Finishing/Converting)</i> ..... | 19          |
| 2.6.5 <i>Matérias Primas Utilizadas para a Produção de Não Tecidos</i> .....                                      | 19          |
| 2.6.6 <i>Alguns tipos de não tecidos</i> .....                                                                    | 22          |
| 2.7 RECICLAGEM DE NÃO TECIDOS .....                                                                               | 25          |

|          |                                                                                                                                             |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.8      | COMPÓSITOS DE POLÍMEROS E NÃO TECIDOS .....                                                                                                 | 27        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                                                                            | <b>31</b> |
| 3.1      | MATERIAIS.....                                                                                                                              | 31        |
| 3.2      | MÉTODOS.....                                                                                                                                | 33        |
| 3.2.1    | <i>Caracterização dos Resíduos de Não Tecidos.....</i>                                                                                      | <i>33</i> |
| 3.2.2    | <i>Preparação dos corpos de prova de Resina Epóxi .....</i>                                                                                 | <i>33</i> |
| 3.2.3    | <i>Preparação dos Compósitos de Resina Epóxi/Não Tecido .....</i>                                                                           | <i>34</i> |
| 3.2.4    | <i>Caracterização dos compósitos .....</i>                                                                                                  | <i>37</i> |
| 3.2.4.1  | <i>Caracterização térmica .....</i>                                                                                                         | <i>37</i> |
| 3.2.4.2  | <i>Caracterização mecânica .....</i>                                                                                                        | <i>37</i> |
| 3.2.4.3  | <i>Caracterização morfológica .....</i>                                                                                                     | <i>38</i> |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                                                                                         | <b>39</b> |
| 4.1      | CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE NÃO TECIDOS .....                                                                                            | 39        |
| 4.1.1    | <i>Não Tecidos de PE/PP .....</i>                                                                                                           | <i>39</i> |
| 4.1.2    | <i>Não Tecidos de PE/PP/PET.....</i>                                                                                                        | <i>41</i> |
| 4.2      | AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, MECÂNICAS E MORFOLÓGICAS DOS<br>COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/FIBRAS DE NÃO TECIDOS DE PE/PP .....        | 43        |
| 4.2.1    | <i>Avaliação Térmica .....</i>                                                                                                              | <i>43</i> |
| 4.2.2    | <i>Avaliação Mecânica.....</i>                                                                                                              | <i>51</i> |
| 4.2.3    | <i>Avaliação Morfológica .....</i>                                                                                                          | <i>55</i> |
| 4.2.4    | <i>Correlação entre propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas .....</i>                                                               | <i>56</i> |
| 4.3      | AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, MECÂNICAS E MORFOLÓGICAS DOS<br>COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/LAMINADOS DE NÃO TECIDOS DE PE/PP/PET ..... | 57        |
| 4.3.1    | <i>Avaliação Térmica .....</i>                                                                                                              | <i>57</i> |
| 4.3.2    | <i>Avaliação Mecânica.....</i>                                                                                                              | <i>60</i> |
| 4.3.3    | <i>Avaliação Morfológica .....</i>                                                                                                          | <i>65</i> |
| 4.3.4    | <i>Correlação entre propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas .....</i>                                                               | <i>67</i> |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                                                                                      | <b>69</b> |
| <b>6</b> | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                                                                                               | <b>71</b> |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                                                                                      | <b>73</b> |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1: MATÉRIAS PRIMAS DAS FIBRAS/FILAMENTOS MAIS UTILIZADAS [32].....                                                                                                                                                                               | 20 |
| TABELA 2: FIBRAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE NÃO TECIDOS [34] .....                                                                                                                                                                                       | 20 |
| TABELA 3: PROPRIEDADES TÍPICAS DOS COMPONENTES DA MATRIZ POLIMÉRICA [56]. .....                                                                                                                                                                         | 31 |
| TABELA 4: VALORES DA TEMPERATURA DE FUSÃO CRISTALINA ( $T_m$ ), VARIAÇÃO DE ENTALPIA E GRAU DE CRISTALINIDADE DO PRIMEIRO E SEGUNDO AQUECIMENTO E TEMPERATURA DE CRISTALIZAÇÃO ( $T_c$ ) OBTIDA DURANTE O RESFRIAMENTO DO NÃO TECIDO DE PE/PP.....      | 40 |
| TABELA 5: VALORES DA TEMPERATURA DE FUSÃO CRISTALINA ( $T_m$ ), VARIAÇÃO DE ENTALPIA E GRAU DE CRISTALINIDADE DO PRIMEIRO E SEGUNDO AQUECIMENTO E TEMPERATURA DE CRISTALIZAÇÃO ( $T_c$ ) OBTIDA DURANTE O RESFRIAMENTO DO NÃO TECIDO DE PE/PP/PET. .... | 42 |
| TABELA 6: PROPRIEDADES TÉRMICAS OBTIDAS POR DSC DA RESINA EPÓXI PURA E DOS COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/FIBRA PE/PP DE NÃO TECIDO COM DIFERENTES TEORES DE RESÍDUO. ....                                                                                  | 46 |
| TABELA 7: TEMPERATURA DE INÍCIO DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA E TEOR DE RESÍDUO DA RESINA EPÓXI E DOS COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/FIBRA DE NÃO TECIDOS DE PE/PP COM DIFERENTES TEORES DE FIBRA. ....                                                             | 50 |
| TABELA 8: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO DA RESINA EPÓXI E DIFERENTES TEORES DE RESÍDUO DE NT. ....                                                                                                                                                   | 51 |
| TABELA 9: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS DA RESINA EPÓXI E DOS COMPÓSITOS COM DIFERENTES TEORES DE RESÍDUO DE NT.....                                                                                                                  | 53 |
| TABELA 10: PROPRIEDADES TÉRMICAS OBTIDAS POR DSC DA RESINA EPÓXI PURA E DO COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/LAMINADO DE NÃO TECIDO DE PE/PP/PET.....                                                                                                          | 58 |
| TABELA 11: TEMPERATURA DE INÍCIO DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA E TEOR DE RESÍDUO DA RESINA EPÓXI E DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI/LAMINADO DE NÃO TECIDOS DE PE/PP/PET.....                                                                                       | 59 |
| TABELA 12: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL DA RESINA EPÓXI E DOS COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/LAMINADO DE NÃO TECIDOS DE PE/PP/PET COM DIFERENTES SENTIDOS DE APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS.....                                                       | 61 |
| TABELA 13: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS DA RESINA EPÓXI E DOS COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/LAMINADO DE NÃO TECIDOS DE PE/PP/PET COM DIFERENTES SENTIDOS DE APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS.....                                                 | 63 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1: PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO HIERARQUIA DOS COMPÓSITOS SINTÉTICOS E NATURAIS [13].                                                                                                           | 11 |
| FIGURA 2: LAMINAS DE REFORÇO TIPO: (A) UNIDIRECIONAL LONGITUDINAL; (B) BIDIRECIONAL BALANCEADO; (C) FIBRAS CURTAS E (D) MANTA CONTÍNUA, SUBMETIDA A ESFORÇOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL LONGITUDINAIS [13]. | 11 |
| FIGURA 3: GRUPO EPÓXI – (A) ÓXIDO DE ETILENO, (B) 1,3-EPÓXI OU ÓXIDO DE TRIMETILENO E (C) 1,4-EPÓXI OU TETRAHIDROFURANO [26].                                                                       | 13 |
| FIGURA 4: REAÇÃO ENTRE OS MONÔMEROS EPICLORIDRINA E BISFENOL A [30].                                                                                                                                | 14 |
| FIGURA 5: ESTRUTURA QUÍMICA DO TRIETILENOTETRAMINA (TETA) [30].                                                                                                                                     | 15 |
| FIGURA 6: APRESENTAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE NÃO TECIDO E TECIDO. A – ESTRUTURA DO VÉU DE UM NÃO TECIDO, B – TECIDO, TRAMA E URDUME EM SUA CONSTRUÇÃO [32].                                             | 16 |
| FIGURA 7: ABRIDOR DE FARDOS [33].                                                                                                                                                                   | 17 |
| FIGURA 8: PROCESSO DE FABRICAÇÃO VIA CARDA (CARDAGEM) – CONSOLIDAÇÃO POR AGULHAGEM [32].                                                                                                            | 18 |
| FIGURA 9: CARDA E DETALHES DOS FIOS FINOS OU DENTES [36].                                                                                                                                           | 18 |
| FIGURA 10: A - PROCESSO DE CONSOLIDAÇÃO POR CALANDRAGEM (CALENDER BONDING). [33]<br>B - PROCESSO DE CONSOLIDAÇÃO PELA PASSAGEM DE AR QUENTE EM CILINDRO PERFURADO (THROUGH-AIR BONDING) [32].       | 19 |
| FIGURA 11: SEÇÃO TRANSVERSAL DE DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS BICOMPONENTES [38].                                                                                                                      | 21 |
| FIGURA 12: DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM TECIDO TIPO SARJA 8HS COM RESPECTIVAS DIREÇÕES [24].                                                                                                           | 23 |
| FIGURA 13: SEÇÃO TRANSVERSAL DE FIBRAS BICOMPONENTES [33].                                                                                                                                          | 24 |
| FIGURA 14: DESCARTE NO ATERRO SANITÁRIO INDUSTRIAL [FONTE: AUTOR].                                                                                                                                  | 26 |
| FIGURA 15: RESÍDUO DE NÃO TECIDO DISPONÍVEL PARA DESCARTE NO ATERRO SANITÁRIO INDUSTRIAL.                                                                                                           | 32 |
| FIGURA 16: RESÍDUO DE NÃO TECIDO DE PE/PP: A-) FIBRAS ABERTAS E B-) IMAGEM AMPLIADA 8X.                                                                                                             | 32 |
| FIGURA 17: RESÍDUO DE NÃO TECIDO DE PE/PP/PET: A-) NÃO TECIDO, B-) SENTIDO LONGITUDINAL AMPLIADO 8X, C-) SENTIDO TRANSVERSAL AMPLIADO 8X.                                                           | 32 |
| FIGURA 18: REAÇÕES DE CURA ENTRE GRUPO EPÓXI E ENDURECEDOR [27].                                                                                                                                    | 34 |

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 19: MOLDE UTILIZADO NOS COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/FIBRAS DE NÃO TECIDOS DE PE/PP .....                                                                                                                      | 35 |
| FIGURA 20: PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS: A – MOLDE UTILIZADO, B - COMPÓSITO LAMINADO NO SENTIDO TRANSVERSAL DAS FIBRAS. ....                                                                                           | 35 |
| FIGURA 21: EXEMPLIFICAÇÃO DAS CAMADAS DO RESÍDUO DE NÃO TECIDO SEGUNDO O SENTIDO DAS FIBRAS ONDE: A-) SENTIDO CRUZADO; B-) SENTIDO TRANSVERSAL E C-) SENTIDO LONGITUDINAL.....                                      | 36 |
| FIGURA 22: CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO DAS DIVERSAS COMPOSIÇÕES ESTUDADAS, ONDE: EPÓXI PURO; TEOR DE 0,6; 1,2; 2,4; LAMINADO SENTIDO LONGITUDINAL; SENTIDO CRUZADO E SENTIDO TRANSVERSAL.....             | 36 |
| FIGURA 23: CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE FLEXÃO EM 3 PONTAS DAS DIVERSAS COMPOSIÇÕES ESTUDADAS, ONDE: EPÓXI PURO; TEOR DE 0,6; 1,2; 2,4; LAMINADO SENTIDO LONGITUDINAL; SENTIDO CRUZADO E SENTIDO TRANSVERSAL..... | 37 |
| FIGURA 24: ENSAIO DE FLEXÃO EM 3 PONTOS [61].....                                                                                                                                                                   | 38 |
| FIGURA 25: TERMOGRAMAS OBTIDOS POR DSC DO RESÍDUO DE NÃO TECIDO PE/PP – 87,5/12,5: A-) 1º AQUECIMENTO, B-) 2º AQUECIMENTO E C-) RESFRIAMENTO. ....                                                                  | 39 |
| FIGURA 26: IMAGEM OBTIDA POR MICROSCOPIA ÓTICA DO RESÍDUO DE NÃO TECIDO DE PE/PP.41                                                                                                                                 |    |
| FIGURA 27: TERMOGRAMAS OBTIDOS POR DSC DO RESÍDUO DE NÃO TECIDO DE PE/PP/PET – 50/15/35: A-) 1º AQUECIMENTO, B-) 2º AQUECIMENTO E C-) RESFRIAMENTO. ....                                                            | 41 |
| FIGURA 28: IMAGEM OBTIDA POR MICROSCOPIA ÓTICA DO RESÍDUO DE NÃO TECIDO DE PE/PP/PET. ....                                                                                                                          | 43 |
| FIGURA 29: TERMOGRAMAS - 1º E 2º AQUECIMENTOS DA RESINA EPÓXI.....                                                                                                                                                  | 44 |
| FIGURA 30: TERMOGRAMAS DO 1º AQUECIMENTO OBTIDOS POR DSC: A) 0,6 PCR DE RESÍDUO DE NT, B) 1,2 PCR DE RESÍDUO DE NT, C) 2,4 PCR DE RESÍDUO DE NT. ....                                                               | 45 |
| FIGURA 31: TERMOGRAMAS DE RESFRIAMENTO OBTIDOS POR DSC:: A) 0,6 PCR DE RESÍDUO DE NT, B) 1,2 PCR DE RESÍDUO DE NT, C) 2,4 PCR DE RESÍDUO DE NT. ....                                                                | 45 |
| FIGURA 32: TERMOGRAMAS DO 2º AQUECIMENTO OBTIDOS POR DSC: A) 0,6 PCR DE RESÍDUO DE NT, B) 1,2 PCR DE RESÍDUO DE NT, C) 2,4 PCR DE RESÍDUO DE NT. ....                                                               | 46 |
| FIGURA 33: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA RESINA EPÓXI.....                                                                                                                                                           | 47 |
| FIGURA 34: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI/FIBRA DE NÃO TECIDO DE PE/PP COM 0,6% EM MASSA DE FIBRA. ....                                                                                     | 48 |
| FIGURA 35: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI/FIBRA DE NÃO TECIDO DE PE/PP COM 1,2% EM MASSA DE FIBRA. ....                                                                                     | 48 |

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 36: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI/FIBRA DE NÃO TECIDO DE PE/PP COM 2,4% EM MASSA DE FIBRA. ....                                          | 49 |
| FIGURA 37: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA RESINA EPÓXI PURA E DOS COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI/FIBRAS DE NÃO TECIDOS DE PE/PP COM DIFERENTES TEORES DE FIBRAS. ...           | 50 |
| FIGURA 38: CURVAS DE TRAÇÃO NAS COMPOSIÇÕES: 0,6 RESÍDUO DE NT; 1,2 RESÍDUO DE NT; 2,4 RESÍDUO DE NT E RESINA EPÓXI. ....                                                | 51 |
| FIGURA 39: CURVAS DE DEFLEXÃO OBTIDAS PELO ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS NAS COMPOSIÇÕES: 0,6 RESÍDUO DE NT; 1,2 RESÍDUO DE NT, 2,4 RESÍDUO DE NT E RESINA EPÓXI. .... | 53 |
| FIGURA 40: MÓDULO DE FLEXÃO NAS COMPOSIÇÕES: 0,6 RESÍDUO DE NT; 1,2 RESÍDUO DE NT, 2,4 RESÍDUO DE NT E RESINA EPÓXI. ....                                                | 54 |
| FIGURA 41: TENSÃO DE FLEXÃO NAS COMPOSIÇÕES: 0,6 RESÍDUO DE NT; 1,2 RESÍDUO DE NT, 2,4 RESÍDUO DE NT E RESINA EPÓXI. ....                                                | 55 |
| FIGURA 42: MICROSCOPIA ÓTICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI COM 0,6 PCR DE NÃO TECIDO DE PE/PP.....                                                                        | 55 |
| FIGURA 43: MICROSCOPIA ÓTICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI COM 1,2 PCR DE NÃO TECIDO DE PE/PP.....                                                                        | 56 |
| FIGURA 44: MICROSCOPIA ÓTICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI COM 2,4 PCR DE NÃO TECIDO DE PE/PP.....                                                                        | 56 |
| FIGURA 45: TERMOGRAMAS DO COMPÓSITO LAMINADO: A-) 1º AQUECIMENTO, B-) 2º AQUECIMENTO E C-) RESFRIAMENTO.....                                                             | 58 |
| FIGURA 46: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI/LAMINADO DE NÃO TECIDO DE PE/PP/PET.....                                                               | 59 |
| FIGURA 47: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA RESINA EPÓXI PURA E DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI/LAMINADO DE NÃO TECIDOS DE PE/PP/PET. ....                                      | 60 |
| FIGURA 48: CURVAS DE TRAÇÃO NAS COMPOSIÇÕES: LAMINADO CRUZADO, LAMINADO TRANSVERSAL E LAMINADO LONGITUDINAL E RESINA EPÓXI. ....                                         | 61 |
| FIGURA 49: CURVAS DE DEFLEXÃO NAS COMPOSIÇÕES: LAMINADO LONGITUDINAL, LAMINADO TRANSVERSAL, LAMINADO CRUZADO E RESINA EPÓXI.....                                         | 63 |
| FIGURA 50: MÓDULO DE FLEXÃO NAS COMPOSIÇÕES: LAMINADO LONGITUDINAL (LL), LAMINADO TRANSVERSAL (LT), LAMINADO CRUZADO (LC) E RESINA EPÓXI. ....                           | 64 |
| FIGURA 51: TENSÃO DE FLEXÃO NAS COMPOSIÇÕES: LAMINADO LONGITUDINAL (LL), LAMINADO TRANSVERSAL (LT), LAMINADO CRUZADO (LC) E RESINA EPÓXI. ....                           | 64 |

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 52: IMAGEM OBTIDA POR MICROSCOPIA ÓTICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI/LAMINADO DE NÃO TECIDO DE PE/PP/PET, MOSTRANDO A DISPOSIÇÃO DAS CAMADAS.....                                            | 65 |
| FIGURA 53: IMAGEM OBTIDA POR MICROSCOPIA ÓTICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI/LAMINADO DE NÃO TECIDO DE PE/PP/PET, COM LAMINADOS DISPOSTOS NO SENTIDO CRUZADO. AUMENTO DE 2,5 X. ....                 | 66 |
| FIGURA 54: (A) E (B) IMAGENS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ÓTICA DO COMPÓSITO DE RESINA EPÓXI/LAMINADO DE NÃO TECIDO DE PE/PP/PET, COM LAMINADOS DISPOSTOS NO SENTIDO LONGITUDINAL. AUMENTO DE 2,5 X..... | 66 |

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\Delta H_m$ - Entalpia de fusão do material ( $Jg^{-1}$ )

$\Delta H_m$  - Entalpia de fusão do material 100% cristalino ( $Jg^{-1}$ )

ABINT - Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

CD - Cross Direction (sentido transversal à máquina)

CDP - Corpo de Prova

CV - Viscose

DETA - Dietilenotriamina

DGEBA - Diglicidil Éter de Bisfenol A (mesmo que BADGE)

DSC - Calorimetria exploratória diferencial

EDA - Etilenodiamina

EDANA - European Disposables and Nonwovens Association

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes

EVA -Copoly (etileno/acetato de vinila)

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal

LDPE - Polietileno de Baixa Densidade

NT - Não Tecido

PA - Poliamida

PE - Polietileno

PE/PET - fibrabicomponente

PE/PP - fibrabicomponente

PET - Poli(tereftalato de etileno)

PNRS-Política Nacional de Resíduos Sólidos

PP - Polipropileno

PVC - Poli (cloreto de vinila)

T - Temperatura ( $^{\circ}C$ )

$T_c$ - Temperatura de cristalização

TEPA - Tetraetilenopentamina

TETA - Trietilenotetramina

TG - Análise termogravimétrica

T<sub>g</sub> - Temperatura de transição vítrea (°C)

TGA - Análise termogravimétrica

T<sub>m</sub> - Temperatura de fusão cristalina

# **1 Introdução**

## **1.1 Considerações Gerais**

Não tecidos são formados por processos de extrusão, podem ser produzidos de forma econômica e possuem grande aplicação na área de produtos descartáveis. Como principais exemplos estão os não tecidos de polipropileno e poliéster que são usados em artigos absorventes descartáveis tais como: fraldas, produtos de higiene feminina e toalhas absorventes. Além disso, esses materiais também são amplamente utilizados como meios de filtração, separadores de baterias e geotêxteis[1].

Em função do baixo custo e por apresentar propriedades satisfatórias para uso na área de saúde, um número crescente de negócios e aplicações vêm sendo criados. Os setores de embalagem e médico hospitalares são os maiores consumidores de produtos à base de não tecidos. Segundo a ABINT (Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos), nos últimos anos o setor cresce a uma taxa de 10% ao ano. Os mercados dos Estados Unidos, Europa e Ásia caracterizam-se como grandes consumidores do produto para uso na agricultura, como forma de proteger as culturas contra o frio, sem perder a oxigenação das plantas, assim como também pode ser utilizado para proteger os jardins do rigoroso inverno. Por ser um material destinado à elaboração de outros produtos, o não tecido caracteriza-se como uma matéria-prima que oferece excelentes oportunidades de criação e aplicação para os mais variados fins. O setor conta com 223 empresas ao redor do mundo que atuam na fabricação de não tecidos e tecidos técnicos. Pode-se dizer que esses produtos proporcionam grande aporte para a economia brasileira apesar das dificuldades para se investir no Brasil, como carga tributária muito alta, excesso de impostos e burocracia, que resulta em sistemas de gestão obsoletos, custos elevados e baixa produtividade, ainda assim, o setor investiu US\$ 200 milhões nos últimos cinco anos [2].

O Brasil é o maior produtor e consumidor de não tecidos e tecidos técnicos da América do Sul, somando mais de 575 mil toneladas/ano, e também conta com um dos parques industriais mais modernos do mundo. Trata-se de uma indústria que investe continuamente em tecnologia e o resultado são produtos de qualidade internacional. O consumo de não tecidos no Brasil é de aproximadamente 1,18 kg/habitante/ano, enquanto a média americana é de 4 kg/habitante/ano. Trata-se de um mercado emergente que tem

crescido continuamente e, nos últimos anos, a ascensão das classes D e E têm contribuído para aumentar este consumo [3].

O crescimento da atividade industrial, em geral, vem acompanhado de maior exploração dos recursos naturais e, quase sempre, tem como consequência uma maior geração de resíduos. Os resíduos gerados nas atividades industriais são muitas vezes inevitáveis, sendo indesejados. Analisando sob a ótica econômica, esses resíduos são indesejáveis porque caracterizam perdas de materiais utilizados nos processos de transformação de insumos em bens e, por isso, devem ser incluídos nos custos dos respectivos produtos ou serviços. Sob a ótica ambiental, a geração de resíduos, bem como o destino dado a esses resíduos, pode representar um aumento do risco de contaminação do meio ambiente, principalmente quando a sua gestão é feita sem a consciência dos possíveis danos ambientais. Por essa razão, a geração de resíduos pelo segmento industrial tem causado preocupação quanto ao seu destino, o que tem levado pesquisadores de várias instituições, acadêmicas e industriais, em diversos países a desenvolverem pesquisas sobre o tema em busca de alternativas de minimização ou reutilização dos resíduos [4-5].

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos EUA, mais de 13 milhões de toneladas de têxteis são descartados a cada ano no país. Desse total, apenas 2 milhões são reciclados, logo há um grande campo de atuação em relação aos 11 milhões de toneladas de tecidos que vão para aterros sanitários americanos [6].

A indústria de não tecido gera uma grande quantidade de resíduo sólido proveniente da produção, sendo constituído de fibras de diversos polímeros, entre os quais se destacam a poliamida, polietileno, polipropileno e poliéster. Esses materiais possuem potencial para serem utilizados como agente de reforço de matrizes termorrígidas, contribuindo para uma melhora nas propriedades mecânicas dessas matrizes e ainda colaborando com a diminuição do resíduo sólido da indústria de não tecido.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é o estudo do reaproveitamento do resíduo sólido derivado da produção de não tecidos (não tecido bicomponente de polietileno (PE)/polipropileno (PP) e PE/PP/poli(tereftalato de etileno) (PET) como agente de reforço para matriz termorrígida (resina epóxi). Este estudo está direcionado na produção de compósitos de resina epóxi/não tecido com diferentes teores de não tecido provenientes da indústria.

Objetivos secundários envolvem o estudo de diferentes tipos e formas (fibras e mantas) de não tecido a fim de alcançar uma melhor distribuição desses materiais no compósito, além da caracterização térmica (através de análises por calorimetria exploratória diferencial e análise termogravimétrica), mecânica (através dos ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos) e morfológica (através de microscopia ótica) dos compósitos desenvolvidos.



## **2 Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Materiais Compósitos**

O estudo de materiais compósitos tem recebido grande atenção por parte de pesquisadores de todo o mundo, pois se mostra como essencial na busca por melhorias de produtos tradicionais e mesmo para a criação de novos produtos. Materiais compósitos são compostos por, no mínimo, duas fases, uma denominada matriz, que é contínua e envolve a outra fase, denominada fase dispersa. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e geometria da fase dispersa, ou seja, a forma da fase dispersa, seu tamanho, sua distribuição e sua orientação [7-9].

Além do reforço e da matriz, pode se afirmar que a interface também constitui uma fase do material compósito, pois a interface envolve a existência de uma região de transição química e física ou gradiente na fronteira. Em um compósito reforçado com fibra, por exemplo, pode-se dizer que existem três fases: a superfície da fibra, a interface fibra/matriz e a matriz [10].

Compósitos são sistemas multifásicos complexos com difícil definição, mas com ampla aplicação na engenharia contemporânea. Considera-se o material compósito como um material formado pela combinação de dois ou mais tipos de materiais em sua composição, insolúveis entre si, forma e composição química diferentes, onde o desempenho das propriedades são melhoradas ou equilibradas quando comparado com cada propriedade dos componentes contidos separadamente. São materiais que apresentam fases heterogêneas e distintas interfaces quando observados microscopicamente [8, 11-12].

Em um contexto mais amplo, os materiais compósitos podem ser divididos em naturais e sintéticos. Entre os compósitos sintéticos, considerando as diferentes classes relacionadas com as várias opções de matrizes, pode-se enumerar uma série de outras classificações decorrentes dos tipos e arranjos dos reforços existentes, onde o reforço pode ser constituído por fibras ou partículas, embebidas em uma matriz de natureza metálica, cerâmica, carbonosa ou polimérica. São também utilizados outros tipos de reforços, tais como: boro, alumina e carbetos de silício, porém são mais limitados. Materiais particulados também podem ser incorporados em compósitos, pois promovem a

melhoria da resistência à compressão. Materiais compósitos com reforços na forma de fibras podem-se dispô-las em feixes paralelos entre si com orientações em multidireções, multicamadas, camadas isoladas ou lâminas [12, 14-15].

Os materiais compósitos têm sido convencionalmente classificados de acordo com a sua natureza química e física da matriz em: cerâmicos, metálicos e poliméricos. Os materiais cerâmicos são inorgânicos e têm como características principais a elevada resistência ao calor e sua extrema fragilidade; os materiais metálicos apresentam como características gerais a ductilidade e excelentes condutividade térmica e elétrica. A grande limitação do uso de metais em compósitos é a sua elevada densidade e custo do processo de fabricação [16].

Os materiais poliméricos, por sua vez destacam-se pela sua baixa densidade, fácil conformação e elevada resistividade elétrica. O maior volume de aplicação de reforço envolve fibras, filamentos ou monofilamentos. O aspecto unidirecional da fibra permite a fabricação da estrutura do compósito, através das facilidades têxteis a que as fibras podem ser submetidas, como: tecidos; não tecidos (*nonwoven*); mechas (*roving*) e fios. Os compósitos constituídos de reforço multidirecional têm como as pré-formas têxteis e se constituem em um salto tecnológico no sentido da obtenção de estruturas maciças de grande volume e com propriedades ajustadas à aplicação a que se destinam. Esse tipo de reforço aprimora as propriedades mecânicas do material que compões a matriz. As fibras mais comuns são as fibras de carbono, vidro, aramidas e poliméricas que determinam custo, desempenho, durabilidade e aplicação do compósito desenvolvido [13, 16-17].

As matrizes poliméricas podem ser termofixas, termoplásticas ou elastoméricas. Dentre as resinas termofixas utilizadas para a produção de compósitos destacam-se as resinas epóxi, fenólicas e de poliéster insaturado [16].

As resinas epóxi, apesar de apresentarem excelentes propriedades mecânicas, são penalizadas por custos elevados e baixa resistência a intempéries. O processo de cura destas resinas é bem mais complexo comparado à resina de poliéster. No caso das resinas fenólicas, sua principal desvantagem perante as resinas de poliéster e epóxi é que, durante a sua cura, ocorre o surgimento de água como subproduto. Portanto, sua aplicação em compósitos é mais complexa, pois a retirada da umidade passa a ser um importante fator durante o processo de fabricação. As resinas de poliéster são usadas em compósitos de uso geral com baixo custo e não tão sofisticados. Depois de curadas, apresentam boas propriedades elétricas e oferecem boas resistência à corrosão e a ataques químicos. Por

outro lado, a resina de poliéster pura é pouco resistente e quebradiça. A cura da resina de poliéster é um processo exotérmico e exige um sistema de cura a base peróxido orgânico como catalisador [16].

As matrizes poliméricas termoplásticas embora reduzam enormemente o custo de fabricação do compósito, não têm sido muito utilizadas em compósitos avançados, para aplicação aeroespacial, por exemplo, uma vez que possuem como limite a temperatura de uso, geralmente inferior as matrizes cerâmicas e metálicas. A grande ênfase dos estudos atuais com relação às matrizes termoplásticas é desenvolver resinas termoplásticas com resistência térmica elevada. As matrizes elastoméricas são muito importantes na fabricação em sistemas compósitos resistentes ao impacto [16].

A interface é de grande importância na determinação das propriedades finais dos compósitos. As tensões que atuam na matriz são transmitidas às fibras através da interface. A adesão inadequada entre as fases envolvidas poderá provocar o início de falhas interfaciais, comprometendo o desempenho global do compósito [18].

Devido aos problemas de compatibilização interfacial de compósitos, foram desenvolvidos mecanismos para melhorar a qualidade da interface em compósitos de matriz polimérica. Estes mecanismos são o uso de agentes de acoplamento ou de modificações na superfície dos reforços ou das matrizes [19].

As características da interface dependem da união na interface, da configuração, da estrutura ao redor da interface e das propriedades físicas e químicas constituintes. Como resultado, a interface tem uma forte influência na propriedade mecânica do compósito. Em geral as ligações na interface são descritas em termos de forças intermoleculares e energia livre na superfície. Na prática, os fatores que influenciam na interação interfacial são: umidade, reação química, adsorção e difusão, presença de tensão residual, morfologia da superfície e efeito da rugosidade [10].

A qualidade da interface entre a matriz e o reforço é fator fundamental no desempenho mecânico do compósito. Para que ocorra interação entre componentes de naturezas químicas diferentes e de quaisquer dimensões ou forma, é essencial a existência de uma área de contato entre elas. Quanto maior for essa área, maior a possibilidade de ocorrer entre os dois componentes uma interação de natureza física, química ou físico-química [20].

## 2.2 Métodos de preparação de compósitos

Na fabricação de compósitos, diversos processos são utilizados industrialmente para a obtenção de peças ou estruturas monolíticas de excelentes propriedades mecânicas e químicas, termicamente estáveis, leves e com formas arrojadas [18]. Materiais poliméricos são mais comumente utilizados na fabricação de compósitos, porque não envolvem necessariamente o emprego de altas pressões de moldagem, e as temperaturas de processo estão abaixo de 300° C. [13].

São vários os processos de fabricação de compósitos, possibilitando a obtenção de produtos com propriedades mecânicas distintas que podem ser utilizados em diferentes campos de aplicações [18]. Os processos de fabricação correspondem a 50 - 60% do custo total de um compósito, por esse motivo é um assunto que demanda significativa atenção da comunidade industrial e científica [13].

Dentre os principais tipos de processos para obtenção de compósitos com matriz polimérica, destacam-se:

*Moldagem manual (handlay-up):* O processo de moldagem manual se caracteriza pela simplicidade de procedimentos para a manufatura de compósitos, não envolvendo nenhum investimento em equipamentos de processo para a manufatura. O processo consiste em se aplicar camadas alternadas de fibras, na forma de tecido ou manta, em orientações predeterminadas, e resina sobre o molde. O processo se inicia com o tratamento da superfície do molde com aplicação de um produto desmoldante para que a peça seja removida do molde após o processo de cura. A resina, com o sistema de cura é aplicada sobre cada camada de fibra, com auxílio de um rolo ou pincel que também possui a finalidade de eliminar as bolhas existentes. A cura tanto pode acontecer na temperatura ambiente ou em estufa, dependendo do tipo de resina ou da necessidade pós cura. Nestes compósitos, frações volumétricas de vazios, por exemplo bolhas de ar, cerca de 15% são observadas [13, 18].

*Moldagem por aspersão (spray-up):* Nesse processo, um dispositivo que realiza a aspersão das fibras e da resina sobre o molde ao mesmo tempo. As fibras picotadas, ou curtas, junto com a resina são projetadas ao molde envolvendo toda a superfície do molde. Assim como o processo manual é utilizado rolo para remover possíveis bolhas de ar e o processo de cura é similar. Este processo é usado na fabricação de peças de formas complexas ou peças muito grandes [13, 18].

*Moldagem à Vácuo:* Aprimoramento dos processos manual e à aspersão, que utiliza o vácuo para se eliminar bolhas e excesso de resina. Após a aplicação normal das fibras e resina no molde, coloca-se um filme flexível sobre o moldado, antes da cura, de maneira que se cubra totalmente o contorno do molde. O vácuo é aplicado entre o molde e o filme, sendo retiradas as bolhas e o excesso de resina, com isso é obtido compósitos com frações volumétricas de vazios inferiores a 5% [13, 18].

*Moldagem sob Pressão (pressure-bag):* Consiste em uma variação do processo de moldagem a vácuo, sendo que nesse processo, após a laminação normal, é aplicada uma pressão na forma de ar comprimido ou vapor sobre o filme flexível que cobre o laminado. Neste caso obtém-se um produto mais compacto e com superfícies mais lisas [18].

*Bobinagem contínua (filamentwinding):* Consiste na bobinagem de um fio contínuo, filamento, que recebe a resina em impregnação, sendo em seguida enrolado em um mandril. É muito utilizado na fabricação de peças cilíndricas que serão submetidas a pressões internas. O processo de bobinagem exige investimento inicial alto em equipamentos e ferramental, mas os materiais utilizados na manufatura e mão de obra têm pouco impacto no componente a ser obtido [13, 18].

*Pultrusão:* Este processo produz compósitos com as fibras orientadas unidirecionalmente sendo o principal processo para a fabricação de barras, tubos e perfis retos nas mais diversas geometrias e formas. Os filamentos contínuos são impregnados num banho de resina e então são forçados a passar por uma matriz com uma fenda de geometria desejada. Estufas são normalmente utilizadas, para assegurar uma perfeita cura e aumentar a velocidade do processo. O reforço é unidirecional, longo e orientado na direção do fluxo [13, 18].

*Moldagem por Compressão:* Neste processo utiliza-se molde de duas partes tipo macho-fêmea na fabricação de compósitos. O reforço pode ser utilizado na forma de mantas ou tecidos, que são alternados com a resina. A impregnação fibra-matriz é feita com ajuda de uma espátula, que também serve para retirar bolhas. O molde é fechado e a cura ocorre enquanto o material está restrito às superfícies das duas partes (macho-fêmea) do molde [18].

*Moldagem por transferência de resina (RTM):* O processo tem início pela deposição do reforço seco, ou pré-forma, com formato e orientação definidos dentro de um molde, procedendo-se com seu deste. A resina polimérica de baixa viscosidade é então injetada, sob baixa pressão para evitar a movimentação do reforço, por meio de uma ou mais válvulas dispostas na câmara do molde. Durante esse tempo, denominado tempo de infiltração, a resina flui através do reforço, provocando seu molhamento uniforme. O ar é expelido por válvulas situadas em regiões opostas à injeção. O molde é então aquecido para que o processo de cura seja efetuado, após a qual a peça é removida do mesmo [13].

Dentre os mais diversos processos possíveis supracitados, ainda existem outros mais, neste trabalho foi utilizado a técnica de processamento de moldagem manual por ser a de acesso simplificado com baixo custo de investimento em equipamentos e matérias-primas.

## **2.3 Compósitos estruturais**

Os compósitos estruturais, por sua vez, são obtidos geralmente pela utilização de fibras contínuas pré-impregnadas com uma matriz termorrígida ou termoplástica. O processamento desses materiais é considerado como tecnologia de ponta, devido às características dos produtos obtidos, como boas propriedades mecânicas aliadas à baixa massa específica ( $<2 \text{ gcm}^{-3}$ ), comparando-se com o metal apresentam boas características como: elevados valores de resistências e módulos específicos, resistência à fadiga, tolerância ao dano, amortecimento, boa resistência à abrasão, boas propriedades elétricas e magnéticas, além de resistência à corrosão [12, 21-22].

A Figura 1 ilustra a classificação dos materiais compósitos.

Em compósitos avançados, outra denominação de compósitos estruturais, muito dos progressos concentra-se em aplicações aeroespaciais, peças automotivas, setores industriais e de commodities domésticos com exigência na combinação de alto desempenho das propriedades dos materiais originais, tais como, baixa densidade, alta resistência mecânica, rigidez e resistência química. Na produção de compósito de matriz polimérica, o uso de não tecidos de mantas agulhadas é benéfico, uma vez que estes materiais podem melhorar a resistência mecânica sem alterar substancialmente a densidade [13, 16, 23].

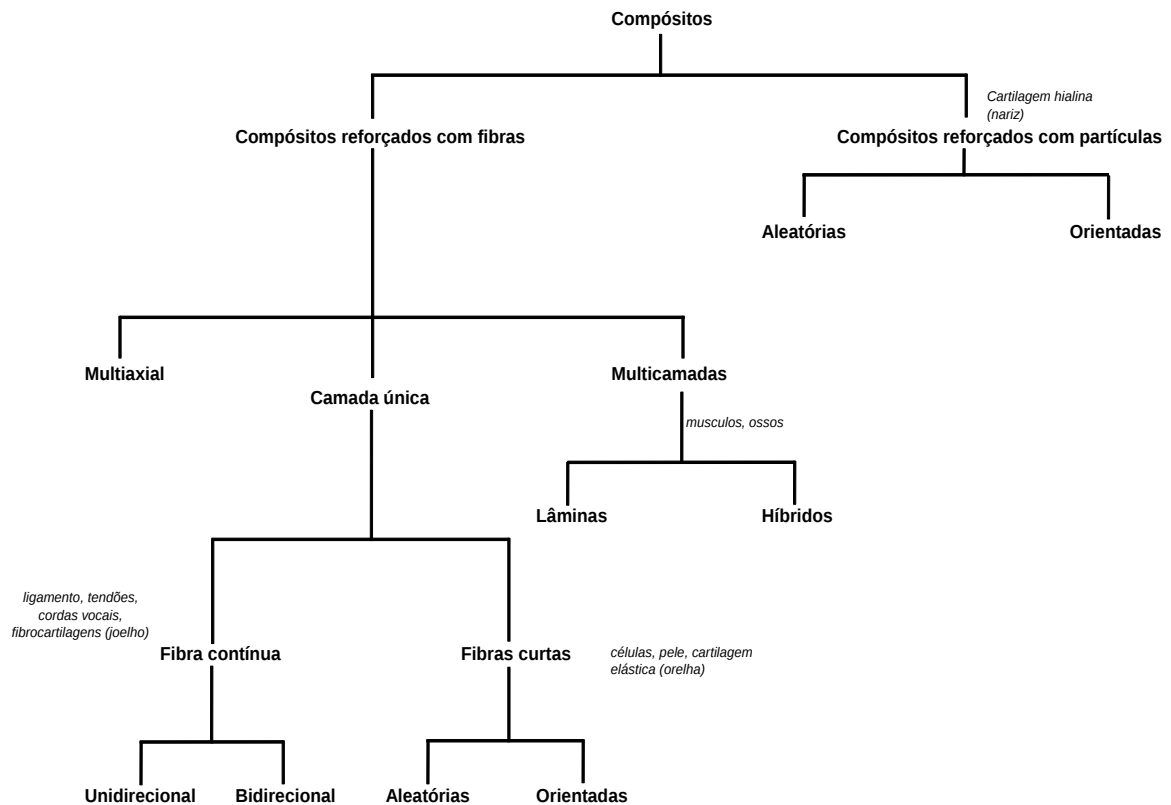


Figura 1: Proposta de classificação hierárquica dos compósitos sintéticos e naturais[13].

A Figura 2 mostra as possíveis disposições das fibras em materiais compósitos.

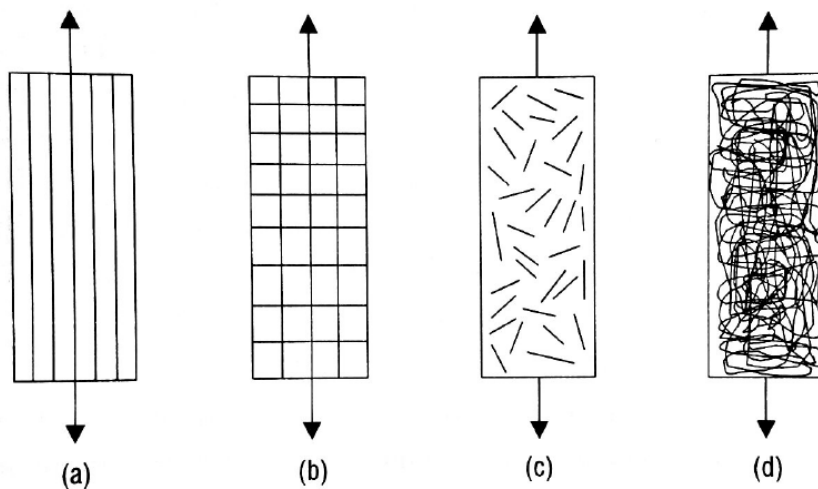


Figura 2: Lâminas de reforço tipo: (a) unidirecional longitudinal; (b) bidirecional balanceado; (c) fibras curtas e (d) manta contínua, submetida a esforços de tração uniaxial longitudinais [13].

Sendo os compósitos da Figura 2 de uma mesma matriz e com o mesmo tipo específico de fibra, considerando que todas relações de massa são idênticas, ao serem

submetidas a esforços de tração uniaxial e longitudinal é possível ilustrar suas diferenças em relação à eficiência de comportamento mecânico.

Os compósitos constituídos de fibras unidirecionais longitudinais e bidirecionais balanceadas (Figura 2-a e 2-b), são estruturalmente mais eficientes em relação com os compósitos constituídos de fibras picadas e mantas contínuas (Figura 2-c e 2-d). No compósito da Figura 2-a, a resistência mecânica e rigidez no sentido longitudinal teriam valores maiores em relação ao compósito da Figura 2-b que apresentariam valores intermediário de resistência mecânica e rigidez e os compósitos das Figuras 2-c e 2-d com valores menores que os compósitos anteriores. No entanto, a resistência mecânica e rigidez no sentido transversal o desempenho do compósito da Figura 2-b seria superior aos compósitos das Figuras 2-a, 2-c e 2-d. Tais tendências indicam que as diversas orientações das fibras, que alteram significativamente o desempenho do material compósito, somado aos: distintos arranjos, combinações de diferentes tipos de matriz e reforços/fibras, é possível obter compósitos estruturais com diferentes características e propriedades. A versatilidade quanto desempenho e aplicação de compósitos estruturais segundo suas propriedades físicas, químicas e mecânicas nos leva ao infinito da imaginação para a obtenção de um compósito estrutural [13].

Compósitos estruturais constituintes de reforços multidirecionais, tanto para aplicação em compósitos poliméricos quanto para compósitos termoestruturais, com adição de uma fração volumétrica de fibras equivalente a ~1 - 2% na direção normal ao plano do compósito é suficiente para conferir tanto resistência ao cisalhamento quanto tenacidade à fratura interlaminar, sem prejudicar as propriedades originais em outras direções. A utilização de reforços multidirecionais permite também maior isotropia de propriedades, maior tenacidade à fratura e resistência às tensões térmicas durante o processamento e em serviço [24].

## **2.4 Resina Epóxi**

Resinas epóxis são consideradas um dos polímeros mais funcionais e de alto desempenho amplamente utilizados no mundo.

O nome "epóxi" é originário de duas palavras gregas, "epi" (acima) e "oxi" (a forma combinada de oxigênio). Hoje em dia, este termo é usado para definir o componente de base e do produto final de resinas epóxi [25]. Outra definição [26] mostra que a palavra epóxi vem do grego "EP"(sobre ou entre) e do inglês "OXI"(oxigênio),

literalmente o termo significa oxigênio entre carbonos. Em um sentido geral, o termo refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. O grupo epóxi mais simples é formado por um anel de três elementos, o qual o termo a-epóxi ou 1,2-epóxi é aplicado, como no caso do óxido de etileno e os termos 1,3 e 1,4-epóxi são aplicados ao óxido de trimetileno e tetrahydrofurano, respectivamente. As estruturas são mostradas na Figura 3.

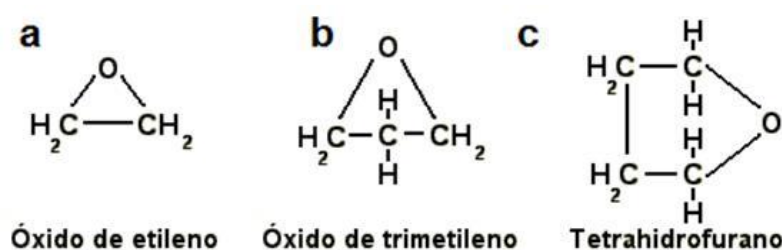


Figura 3: Grupo epóxi – (a) Óxido de etileno, (b) 1,3-epóxi ou óxido de trimetileno e (c) 1,4-epóxi ou tetrahydrofurano[26].

As resinas epóxi são uma família de produtos sintéticos altamente versáteis utilizados como aglutinantes para revestimentos, adesivos, selantes e matrizes para materiais compósitos, compósitos reforçados de fibra de vidro, na dissipação eletroestática, produção de laminados e na indústria eletrônica para o encapsulamento de circuitos integrados. Esses produtos são por sua vez utilizados em muitas aplicações, como turbinas eólicas, construção e engenharia civil, automóveis, aeroespacial, piso, tubulações, embalagem, eletrônicos, eletrodomésticos e esporte e lazer. As resinas epóxi podem ser misturados com uma variedade de agentes de cura, à abertura de um mundo de possibilidades para aumentar a durabilidade, segurança e fiabilidade [25, 27-28].

As resinas epóxi mais comuns são baseadas na reação de epícloridrina com bisfenol A, como mostrada na Figura 4. Esta reação produz uma substância química diferente chamada bisfenol A diglicidiléter, que é uma resina de baixo peso molecular conhecido como DGEBA ou BADGE. Atualmente, resinas à base de DGEBA são os tipos mais amplamente comercializados, além da grande aplicação em compósitos poliméricos, as resinas epoxídicas são utilizadas em tintas, encapsulamento de componentes eletrônicos, moldes e matrizes para ferramentas industriais e é muito importante também com adesivos [25,29].

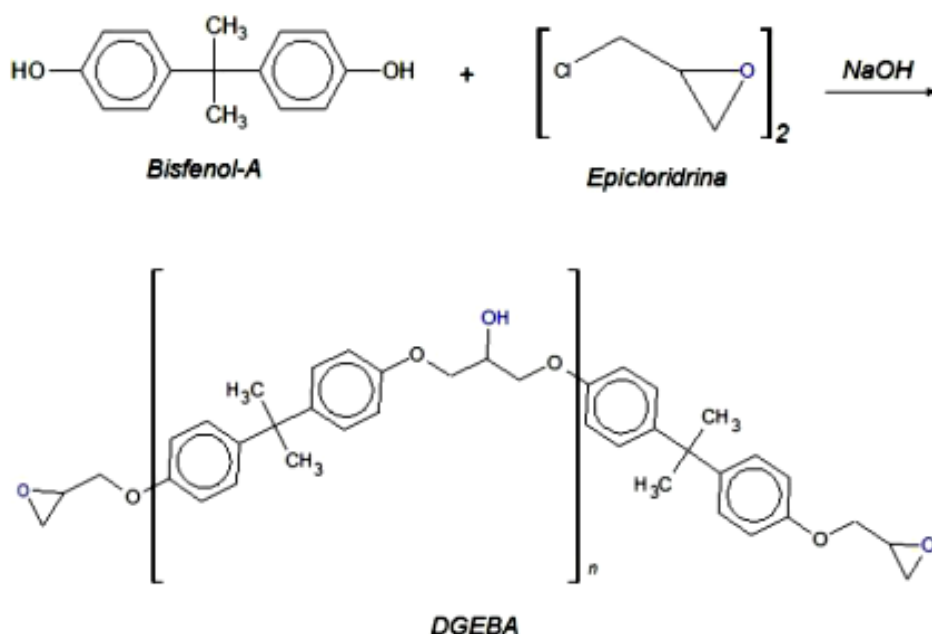


Figura 4: Reação entre os monômeros epicloridrina e Bisfenol A [30]

As resinas epóxi são polímeros termofixos com exclusivas propriedades de resistência mecânica. É o resultado de uma reação química chamada cura, que envolve além da resina epóxi, outros produtos químicos comumente conhecidos como endurecedores ou agentes de cura. Um certo número de substâncias pode ser utilizada como endurecedores, incluindo poliaminas, aminoamidas ou compostos fenólicos [25].

O processo de cura consiste em uma reação exotérmica e pode ocorrer através de dois sistemas basicamente: resinas epóxi que reagem com elas mesmas (homopolimerização catalítica) ou através de ligação cruzada com um endurecedor. O resultado do processo de cura gera termofixosepoxídicos, com adesão única, durabilidade, resistência e versatilidade [25, 31].

As resinas epóxi podem ser curadas com vários agentes de cura conforme as necessidades de cura e produto final. As aminas alifáticas são endurecedores muito populares utilizados na indústria de produção de compostos de epóxi, isto se deve ao fato de possuírem menor custo, menor viscosidade e maior facilidade de mistura do que aminas aromáticas. Além disso, as aminas alifáticas possibilitam à obtenção de um epóxi que pode ser curado a temperatura ambiente.

As aminas alifáticas são em sua maioria, líquidos de baixa viscosidade com odor característico e irritante. Alguns tipos mais usados são o etilenodiamina (EDA),

dietilenotriamina (DETA), trietilenotetramina (TETA), tetraetilenopentamina (TEPA), etc. A Figura 5 apresenta a estrutura química do endurecedor TETA. Em geral são moléculas pequenas e muito voláteis, que basicamente, reagem através dos seus radicais hidrogênio livre [26].

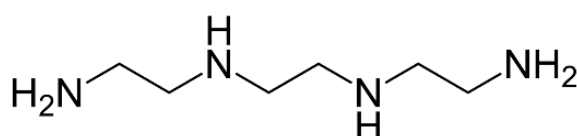


Figura 5: Estrutura química do trietilenotetramina (TETA) [30].

## 2.5 Nãotecido

Conforme a norma NBR-13370 um nãotecido é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e combinações destes. Excluem-se desta definição o papel, os feltros por feltragem (agulhados ou não adicionalmente), os produtos obtidos por tecelagens, malharia e os transformados por meio de costuras com fios incorporantes ou filamentos de ligação/reforço[32-34].

Para melhor compreensão do que é um não tecido, é importante definir tecnicamente um tecido. Conforme a ABNT/TB-392, tecido é uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de trama e outro conjunto de fios de urdume, formando ângulo de (ou próximo)a 90°. Há ainda as definições de: trama que é um conjunto de fios dispostos na direção transversal (largura) do tecido e urdume que é um conjunto de fios dispostos na direção longitudinal (comprimento) do tecido. A Figura 6 apresenta a estrutura de um tecido e um não tecido comparativamente.

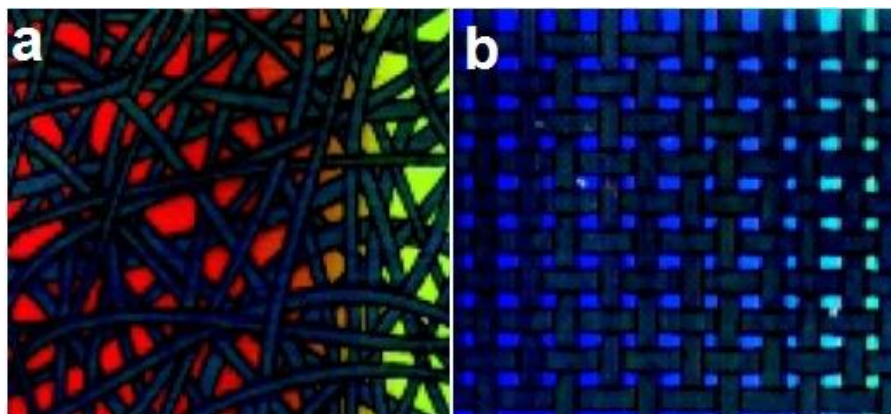


Figura 6: Apresentação das estruturas de não tecido e tecido. a – estrutura do véu de um não tecido, b – Tecido, trama e urdume em sua construção [32].

### 2.5.1 Classificação dos nãotecidos

É possível classificar os não tecidos de acordo com as matérias-primas, métodos de produção, agentes ligantes, aplicação final na qual serão utilizados e suas propriedades. O método de classificação comumente utilizado é o da classificação de acordo com o método de produção. O método de produção é dividido em úmido, seco com fibras cortadas e seco com filamentos. Dentro da divisão dos três principais há várias etapas comuns a todos os processos e outras que pertencem apenas a alguns desses processos. Deve ser enfatizado que processos diferentes são regular e frequentemente combinados [33]. Ainda pode-se classificar os nãotecidos segundo sua massa em função do metro quadrado: *Não tecido leve* possui relação menor que  $25 \text{ g/m}^2$ , *não tecido médio* possui relação entre  $26$  e  $70 \text{ g/m}^2$ , *não tecido pesado* possui relação entre  $71$  e  $150 \text{ g/m}^2$  e *não tecido muito pesado* possui relação acima de  $150 \text{ g/m}^2$ .

## 2.6 Métodos de obtenção de nãotecidos

Existem diversos métodos de obtenção para um não tecido, com isso esse trabalho apresentará os métodos utilizados, ou partes deles, para obtenção dos não tecidos que foram aplicados como reforços nos compósitos.

### 2.6.1 Abridor de fardos

As fibras são as matérias primas dos não tecidos e é fornecida na forma de fardos. A pressão exercida para fazer esse empacotamento faz com que as fibras fiquem na forma de tufo compactados. A preparação das fibras consta a sua abertura e mistura. A ação de

abertura não pode ser muito enérgica para evitar quebra, estiramento, perda de ondulações e outras propriedades das fibras. A técnica de preparação consiste em ter um abridor de fardos colocados em disposição correta de maneira que as fibras cheguem ao equipamento de formação de véu, carda, em forma de flocos leves e abertos. O abridor de fardos também efetua as primeiras batidas, uma pré-mistura das fibras, cuja alimentação está acoplada a uma esteira, a Figura 7 apresenta esse equipamento [33].

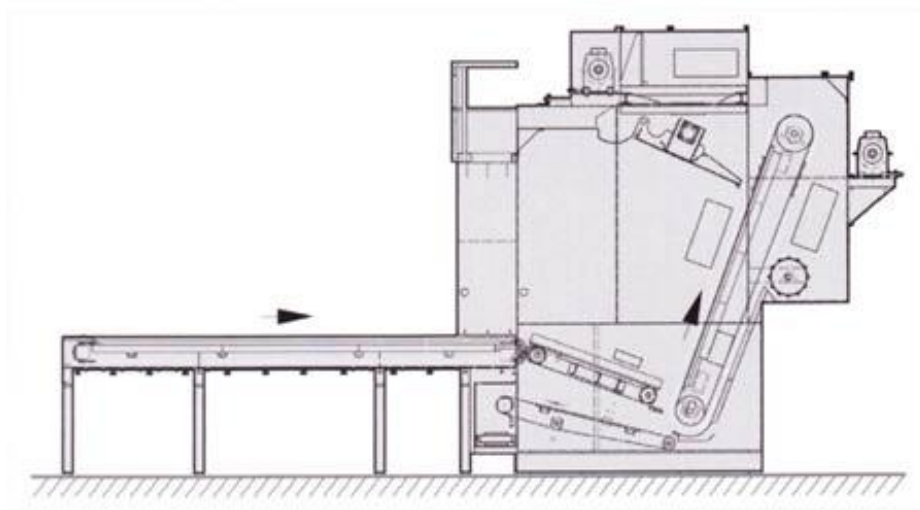


Figura 7: Abridor de fardos [33]

### 2.6.2 Cardagem (Formação da manta)

Posterior ao abridor de fardos, mistura e transporte das fibras, elas são penteadas para uma máquina de cardação. A cardagem é o processo mecânico de consolidação da manta, a carda é um tambor ou uma série de tambores cobertos em fios finos ou dentes rotativos. A configuração precisa da carda dependerá do peso do não tecido e a orientação requerida das fibras. A manta pode ser paralela, onde a maioria das fibras são colocadas no sentido de deslocamento da manta, ou podem ter sentidos aleatórios. Mantas cardadas paralelas tipicamente resultam em boa resistência à tração, baixo alongamento e baixa resistência ao rasgamento no sentido MD (sentido da máquina) e vice-versa no sentido CD (sentido transversal da máquina). Velocidades relativas e composição da manta podem ser variadas para produzir uma ampla gama de não tecidos com propriedades diferentes [35]. As Figuras 8 e 9 esquematizam esse processo.

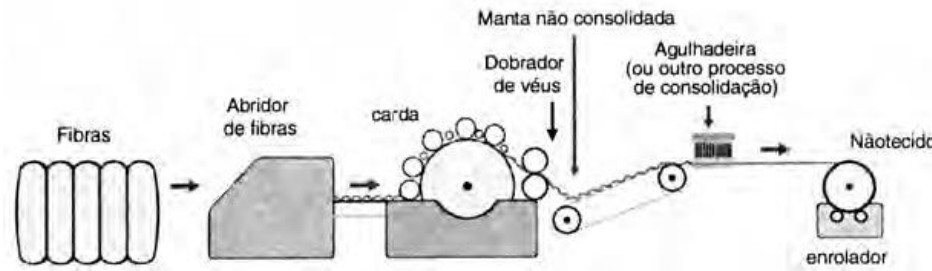


Figura 8: Processo de fabricação Via Carda (cardagem) – Consolidação por agulhagem [32].

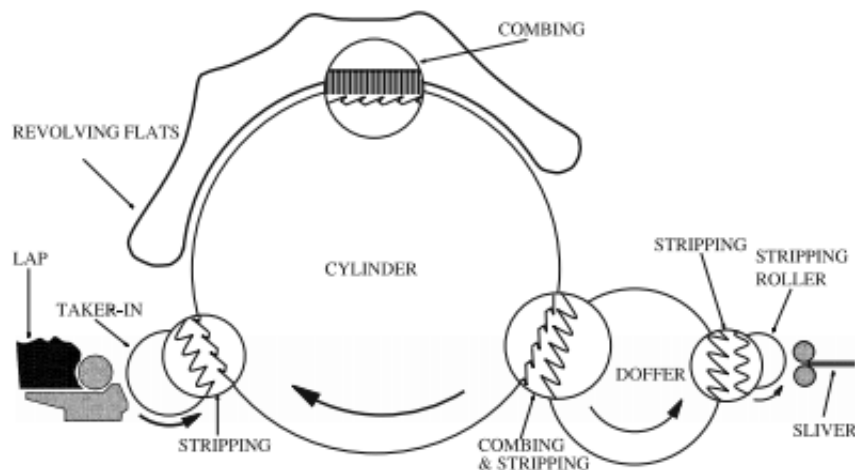


Figura 9: Carda e detalhes dos fios finos ou dentes [36].

### 2.6.3 Consolidação da Manta

Após a formação do véu ou da manta é necessário realizar a consolidação, ou seja, união das fibras ou filamentos que em grande parte dos não tecidos também são responsáveis pelo acabamento necessário para o produto final. Existem três métodos básicos para consolidação/acabamento de não tecidos: mecânico, químico e térmico, que também podem ser combinados entre si. O **mecânico** possui três técnicas: manta agulhada onde se usa agulhas para entrelaçar as fibras e é um dos processos mais antigos, hidroentrelaçamento onde o entrelaçamento das fibras é feito por jatos d'água e por costura onde ocorre a inserção de fios de costura na manta. O **químico** que possuem as fibras ligadas por resinas. Os não tecidos utilizados nesse trabalho são provenientes do processo **térmico**.

Nas mantas consolidadas termicamente, *thermobonded*, as ligações das fibras do não tecido são realizadas pela ação de calor, através da fusão das próprias fibras. Dois

métodos são utilizados: por calandragem ou por ar quente [32]. A Figura 10 representa os dois processos.

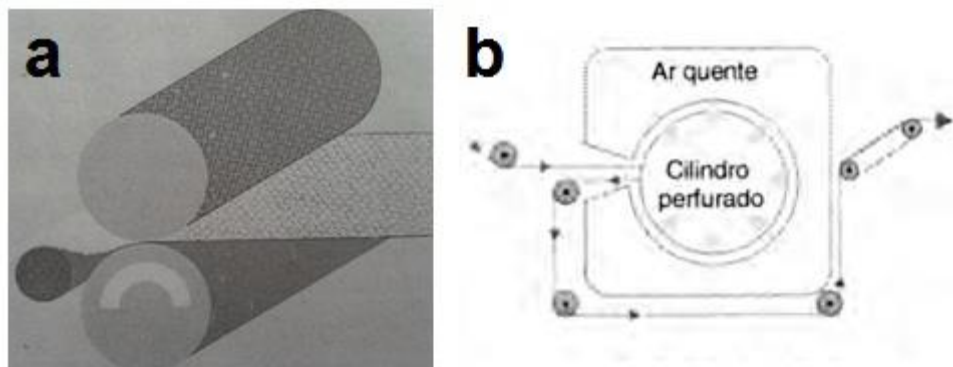


Figura 10: a - Processo de consolidação por calandragem (CalenderBonding). [33] b - Processo de consolidação pela passagem de ar quente em cilindro perfurado (Through-Air Bonding) [32].

#### **2.6.4 Transformação, Acabamento e/ou Conversão do não tecido (FabricFinishing/Converting)**

Os não tecidos como fabricados são fornecidos normalmente em grandes rolos e chamados de “RollGood”, podendo sofrer processo posterior de transformação ou conversão. Pode-se utilizar vários tipos de transformação, acabamento e/ou conversão para os não tecidos, como exemplo: corte em menores larguras e peças, confecção, dublagem, impregnação, cobertura, adesivagem, tingimento, estampagem, impressão, chamuscagem, laminação, dentre outras; inclusive alguns processos de consolidação que foram mencionados (agulhagem, calandragem, resinagem, costura e outros) [32].

#### **2.6.5 Matérias Primas Utilizadas para a Produção de Não Tecidos**

Na maioria dos casos, as fibras/filamentos representam a principal matéria-prima na fabricação dos não tecidos. Sua proporção nos produtos finais varia de 30 a 100%. É sempre indispensável à indicação nominal e porcentual da composição de suas matérias primas constituintes. As propriedades das fibras/filamentos somadas às fornecidas pelo processo de fabricação/consolidação/transformação definem as características finais dos não tecidos e também seu desempenho. As matérias primas das fibras/filamentos mais utilizadas são apresentadas na Tabela 1. A produção de não tecido é dominada por

completo por fibras artificiais ou sintéticas e correspondem a 90% do consumo como matéria prima. Fibras sintéticas se enquadram em três categorias: feitas por polímeros naturais, feitas a partir de polímeros sintéticos e feitas a partir de materiais inorgânicos, conforme mostrado na Tabela 2 [32, 34, 37].

Tabela 1: Matérias primas das fibras/filamentos mais utilizadas [32]

| <b>Tipo de fibra</b> | <b>Matéria prima</b>                                                                            |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Artificiais          | Viscose, Vidro, Silicone e Acetato.                                                             |
| Naturais             | Lã, Algodão, Coco, Sisal, Cashmere, Asbesto, Metálicas (níquel-cromo, cério-cromo) e Cerâmicas. |
| Sintéticas           | Poliéster, Polipropileno, Poliamida, Polietileno, Poliacrilonitrila e Policarbonato.            |

Tabela 2: Fibras utilizadas na produção de não tecidos [34]

| <b>Fibra</b>            | <b>% de uso pela indústria de não tecidos</b> |
|-------------------------|-----------------------------------------------|
| Polipropileno           | 63                                            |
| Poliéster               | 23                                            |
| Rayon viscose           | 8                                             |
| Acrílica                | 2                                             |
| Poliamida               | 1,5                                           |
| Outras fibras especiais | 3                                             |

Um ganho para aplicações especiais e processo de não tecido é o uso de fibras bicomponentes. O objetivo da fiação de fibras bicomponentes é o de ultrapassar as limitações da fiação de um único componente convencional. Com isso, a mistura de polímeros para a produção de fibras bicomponentes atingi melhor processamento e propriedades funcionais a uma utilização final específica [38].

Existem várias variantes de fibras bicomponentes com diferentes fases (em termos de quantidade e localização) e as interfaces personalizadas. Fiação de fibra

bicomponente é um tipo mistura durante a fiação. Dependendo da escolha dos componentes, eles podem ser compatíveis ou não compatíveis. A primeira categoria resulta em uma fase homogênea e sua fiação se assemelha a fiação de homopolímeros de um único componente. A incompatibilidade entre os polímeros resulta em separação de fases. O controle da morfologia torna-se mais desafiador. As seções transversais de diferentes fibras bicomponentes são mostrados na Figura 11 [38].

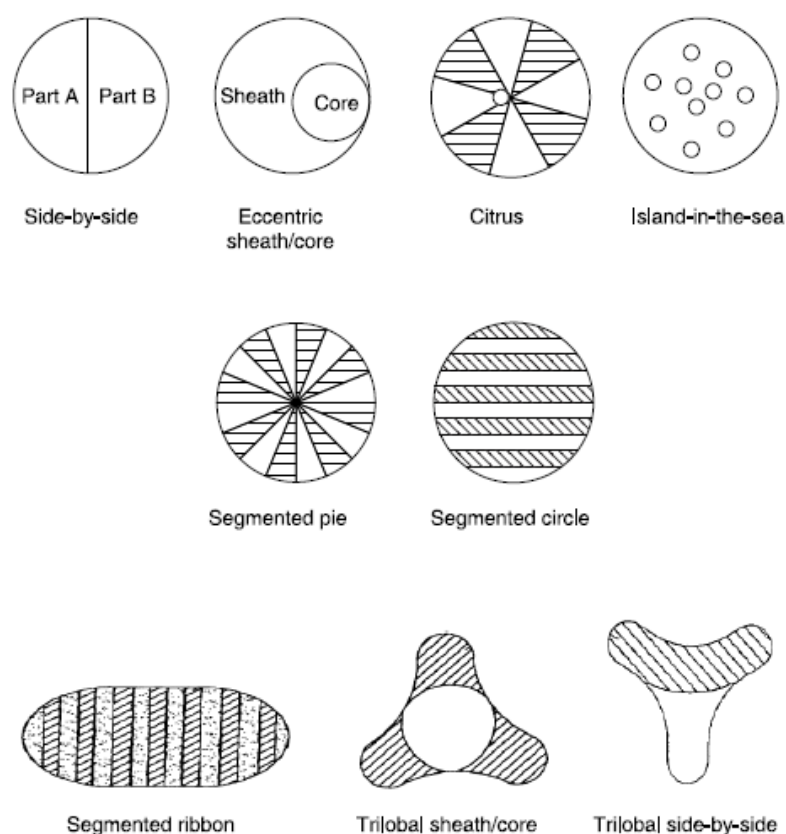


Figura 11: Seção transversal de diferentes tipos de fibras bicomponentes [38].

Cada tipo de fibra bicomponente tem uma utilização final especial. Fibras lado a lado (*side-by-side*) e núcleo/coróia (*core/sheath*) apresentam propriedades de auto-cravação. Fibras núcleo/coróia com revestimento de polipropileno, na coróia, em torno do núcleo de nylon pode potencialmente produzir uma fibra com a resistência ao desgaste de uma fibra de nylon e exibir a resistência a manchas de uma fibra de polipropileno. Fibras bicomponente trilobal são usadas especialmente para aplicações de filtração. Na indústria de *meltblown*, fibras do núcleo/coróia são utilizados como uma fibra termoaglutinantes. Tem que existir uma forte ligação entre os dois materiais para evitar a divisão da fibra.

Fibras feitas de espécies quimicamente diferentes irão necessitar de tratamento especializados para aumentar a força da interface. A separação das fibras pode ser realizada por meios térmicos, mecânicos ou químicos [38].

Além das matérias primas, outros compostos são utilizados para a obtenção de não tecido como: i) ligantes (resinas) que são produtos químicos usados para consolidação, transformação e acabamento dos não tecidos; ii) dispersões poliméricas, como olátex sintético (polímero insaturado de butadieno), polímeros de ácido acrílico, polímerosvinílicos (acetato de vinila, éter vinílico, cloreto de vinila), ou copolímeros destes; iii) soluções, como apoliuretana e borracha silicônica e iv) sólidos (pós e pastas) como termoplásticos (copoliâmidas, polietileno, EVA e PVC) e termofixos (resina fenólica) [32].

#### **2.6.6 Alguns tipos de não tecidos**

Pré-formas podem ser definidas genericamente como uma estrutura de fibras de reforço não impregnadas e prontas para moldagem. Pré-formas de tecidos são elementos básicos de reforço formadores de compósitos estruturais. Tecidos são constituídos por duas direções principais: urdume (comprimento) e trama. Os tecidos podem ser híbridos, constituídos por mais de um tipo de fibra ou por fibras com acabamentos superficiais diferentes que irão determinar principalmente as propriedades mecânicas do próprio tecido assim como no compósito que o conter. Pré-formas híbridas são formadas por fibras de naturezas distintas como fibra de carbono e de vidro. Possuem estruturas de fibras de diferentes configurações, como por exemplo as mantas e feltros, que por sua vez são não tecidos que possuem estruturas planas, flexíveis e porosas [13, 33].

Não tecidos de mantas agulhadas possuem fibras orientadas tridimensionalmente devido ao entrelaçamento das fibras. Este processo de agulhagem é a técnica mais prática de fabricação, comparada a outros tais como tecelagem e costura. No entanto, o processo de agulhagem é o mais antigo e estável método de formação de mantas de não tecido com fibras sintéticas, tais como viscose, poliéster e polipropileno. A manta agulhada é composta de uma rede de fibras sobrepostas que criam poros conectados que através do qual a resina pode fluir facilmente e formar um mecanismo de ligação com as fibras [16].

É de conhecimento que, quanto maior a complexidade e o projeto de uma pré-forma, maior é o seu custo, e portanto, a utilização de materiais de baixo custo é desejada desde que não sejam comprometidos os requisitos mecânicos estabelecidos no projeto. As

pré-formas para elementos de fricção de alto desempenho, por exemplo, podem ser manufaturadas pelo agulhamento de fibras curtas de baixo custo, ou agulhamento de tecidos, ou mesmo híbridos agulhados destes. Um não tecido de manta agulhada de fibras de carbono de  $\sim 5$  mm de espessura e  $500 \text{ gm}^{-2}$  custa aproximadamente US\$ 50,00 enquanto que um tecido com tela 8HS (como mostrado na Figura 12), com  $\sim 0,25$  mm de espessura e  $300 \text{ gm}^{-2}$ , tem custo aproximado de US\$80.00 [24]. Logo, pré-formas híbridas de não tecido e tecido são um atrativo para redução de custo do projeto com uso de diferentes tipos de fibras que podem agregar em nas propriedades do compósito.

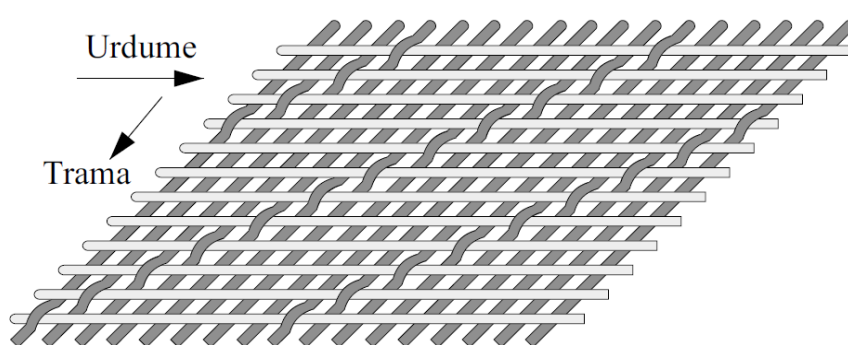


Figura 12: Desenho esquemático de um tecido tipo sarja 8HS com respectivas direções [24].

Os principais tipos de não tecidos são mostrados a seguir:

**Nãotecido de PE/PP:** O polietileno (PE) e o polipropileno (PP) são polímeros termoplásticos constituintes da fibra bicomponente do tipo núcleo/corôa, mostrados na Figura 13, onde o polímero de maior temperatura de fusão cristalina (no caso o PP) fica localizado no núcleo. São utilizadas no processo de consolidação térmica com a ligação feita em pontos que proporciona maciez apreciável e flexibilidade ao não tecido. É de conhecimento que a temperatura de fusão cristalina do PE está entre 105 e 125 °C e do PP em torno de 165 °C, com isso a formação do véu pode ser por via seca (cardada ou fluxo de ar), pré-consolidação mecânica (agulhagem) e consolidação térmica (calandragem ou ar quente), onde a coesão ocorre entre as fibras com menor temperatura de fusão que estão localizadas na corôa, logo um gasto energético menor em comparação a uma fibra 100% PP. O resíduo é proveniente do acerto da largura da peça final, aureola, que é picado em pedaços de tamanhos aleatórios e destinado ao aterro industrial foi utilizado na elaboração dos compósitos fibra/resina epóxi.

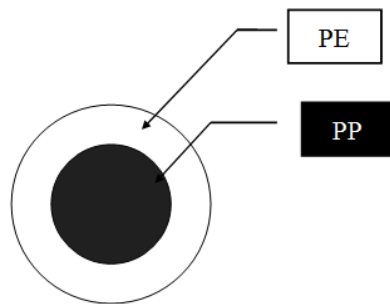


Figura 13: Seção transversal de fibras bicomponentes [33].

**Não Tecido de PE/PET:** O não tecido proveniente de fibras bicomponentes são aplicados em várias áreas como automotivo, hospitalar, calçado e vestuário, conforme a exigência de gramatura, espessura, resistência, etc. Assim como fibras de PE/PP, fibras bicomponentes de PE/PET são largamente utilizadas em processo de consolidação térmica como o PET tem maior temperatura de fusão cristalina, em torno de 260 °C, fica no núcleo. Por não utilizar tratamentos químicos e com uso de fibras bicomponentes, pode se dizer que é um processo ecologicamente correto, pois não geram resíduos líquidos ou sólidos consequentemente a ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) não é utilizada, principalmente para combinações de PE/PET onde o PET é oriundo da reciclagem das garrafas descartáveis. O retorno dos resíduos de não tecido para a produção de novos produtos depende da aplicação final, pois algumas áreas como a higiene pessoal, absorventes íntimos e fraldas não podem conter contaminantes que podem existir por causa do processo de abertura desse resíduo, ou até mesmo devido à gramatura do residual, onde não tecidos pesados são difíceis de serem reprocessado, pois a pré-consolidação mecânica por agulhagem mais a consolidação térmica torna as ligações das fibras muito fortes e o processo de abertura gera muito pó o que inviabiliza a reutilização em aplicações como o vestuário e calçados. Esse pó proveniente da abertura também exigirá do sistema de sucção, que se não for efetivo irá comprometer o equipamento de cardagem e outros sistemas de formação de vel. Com isso, o residual utilizado nesse projeto é proveniente do acerto da largura da peça final de um não tecido ou da partida de linha que não pode retornar para o processo convencional e foi utilizado na elaboração de compósitos laminares.

**Nãotecido de PA:** O residual do não tecido é composto de fibra de poliamida(PA) ou combinações com outras fibras de PES (poliéstersulfona) ou bicomponentes. Essa

mistura de fibras agrega características físicas ou químicas ao não tecido que são exigidas por normas do seguimento que será aplicado, como exemplo: automobilístico, vestuário ou calçados, até mesmo devido à limitação do processo de cardagem que é utilizado na consolidação do véu. O resíduo proveniente da fibra de poliamida tem o véu formado por carda e passa por dois processos de consolidação, mecânico por agulhagem e químico por resinagem. A combinação desses processos gera um não tecido de alta resistência abrasão e ruptura.

Para que sua superfície tenha um tato agradável passa por um processo abrasivo onde, para o material particulado não ficar em suspensão no ar, o pó residual é coletado por aspiração e acondicionado para descarte.

## **2.7 Reciclagem de não tecidos**

Nos últimos anos, a indústria de não tecidos cresceu em uma velocidade rápida, oferecendo uma ampla gama de produtos para diversas aplicações. De acordo com EDANA 2010 estatística, a indústria europeia de não tecidos (Europa, Turquia e alguns importantes produtores russos) produziu cerca de 1,78 milhões de toneladas de não tecidos em 2010. No entanto, um setor tão grande gera uma grande quantidade de resíduos, incluindo resíduos da linha de produção do cliente e consumidor final. Hoje, a maioria das fábricas utiliza resíduos de não tecidos na linha de produção. No entanto, parte dos não tecidos tratados quimicamente tem seus resíduos incinerados ou destinados para aterros, o que leva à possível formação de materiais perigosos para o ambiente. Dessa forma, a reciclagem deste resíduo tornou-se uma tarefa importante e um atraente assunto para os pesquisadores nos últimos anos. Portanto, a utilização de resíduos têxteis em compósitos poliméricos pode ser uma alternativa para o problema do aumento de volume destes resíduos [39]

Segundo a PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos), todos que fazem parte da cadeia produtiva: fabricante; importador, distribuidor; comerciante e até o consumidor, são responsáveis pela correta destinação do produto/resíduo onde utiliza como princípio fundamental a logística reversa. A logística reversa é o processo responsável pelo planejamento, implementação e controle do destino dos produtos e materiais colocados no mercado. Considerando os novos mercados onde inovação e sustentabilidade soma com a PNRS, 70% das indústrias já colocam a sustentabilidade nos seus modelos de inovação. ABRELP (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais)

divulgou que para coletar e dar destinação adequada à totalidade dos resíduos sólidos, o Brasil precisa investir R\$ 6,7 bilhões, considerando como modalidade de destinação a disposição em aterros sanitários. O aterro sanitário é o primeiro estágio rumo à adequação na destinação final e, em muitos casos, é o caminho para se avançar rumo a outras formas mais modernas de destinação. Considerando essa rota, o montante que o Brasil precisa investir representa um custo diário médio *per capita* de apenas R\$ 0,09 [40-42]. A Figura 14 apresenta o descarte dos resíduos de não tecidos conforme a legislação vigente.



Figura 14: descarte no aterro sanitário industrial [Fonte: autor].

O IBAM (Instituto Brasileiro de Administração Municipal) ressalta em seu manual “Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos” a importância do acondicionamento adequado dos resíduos sólidos, evitando acidentes, proliferação de vetores, minimizando o impacto visual e olfativo, reduzindo a heterogeneidade dos resíduos (no caso de haver coleta seletiva), facilitando sua realização. É comum a indústria de não tecido ter uma parcela de resíduo gerado durante a produção do produto acabado. Em uma empresa que se tem como matéria prima a viscose (CV) tem a fibra introduzida nos abridores e posteriormente passa para as cardas, onde a fibra escapa por vários pontos da máquina, não podendo ser retornada ao processo, pois o contato com o meio externo, em relação à máquina, ocasiona sua contaminação, sofrendo uma diferença granulométrica, podendo causar problemas operacionais. Essa fibra é considerada resíduo[43, 44].

Resíduos de não tecido foram utilizados em algumas aplicações, em 2010 foi recuperado 76 mil toneladas de PET no Brasil que foram utilizadas para produção de não tecido devido ao investimento em maquinários do setor. A Volkswagen do Brasil lançou em 2013 o primeiro veículo comercial leve do país com tecidos a base de PET no revestimento de bancos e interior de portas. O tecido é composto por até 60% de fio reciclado, sendo que sua matéria-prima bruta é fornecida por empresas certificadas por órgãos ambientais internacionais [45, 46].

Dessa forma, esse trabalho também tem como objetivo contribuir com a diminuição do descarte desses não tecidos em aterros e utilizar essa matéria prima como um agente de reforço para matrizes termofixas, buscando-se aplicações em engenharia.

## **2.8 Compósitos de Polímeros e Não Tecidos**

Não tecidos compósitos são considerados materiais técnicos avançados que são criados por uma indústria moderna e inovadora através da combinação de diferentes materiais, tecnologias e substratos. Cientistas e engenheiros do ramo de não tecidos estão combinando várias fibras e filamentos, diferentes processos e tecnologias, e vários substratos e estruturas para produzir uma nova geração de materiais de não tecidos. Estes materiais estão oferecendo soluções de engenharia através da criação de produtos multifuncionais, bem como soluções econômicas, eliminando muitas etapas do processo e substituindo dois ou mais produtos a um produto [38].

Com o avanço do polímero e das fibras materiais e tecnologias de fabricação é possível selecionar materiais adequados e tecnologias apropriadas para o processo, ou uma combinação dos mesmos a desenvolver sob medida produtos não tecido compósito para uma variedade de aplicações. Eles são encontrados para oferecer propriedades superiores em comparação com não-tecidos tradicionais e isso estabelece um futuro promissor para os não tecidos compostos [38].

Na produção de compósito de matriz polimérica, o uso de não tecidos de mantas agulhadas é benéfico, uma vez que estes materiais podem melhorar a resistência mecânica sem alterar substancialmente a densidade [13, 16, 23]. Diversos trabalhos na literatura descrevem de maneira positiva a utilização de não tecidos como agentes de reforços para polímeros.

Yalcin e colaboradores [39] desenvolveram compósitos de não tecidos de PET com duas matrizes termoplásticas (polipropileno - PP e polietileno de baixa densidade -

PEBD). Os compósitos foram obtidos por extrusão. A análise das propriedades mecânicas de tração mostrou um aumento no módulo elástico quando se utilizou PEBD como matriz polimérica e diminuição do módulo elástico quando se utilizou o PP como matriz polimérico, tal fato foi devido à maior adesão das fibras de não tecido na matriz de PEBD, quando comparada a adesão das fibras na matriz de PP.

A utilização de matriz termorrígida tem-se mostrado mais eficaz para a preparação de compósitos reforçados com não tecidos. Shindo e colaboradores [47] desenvolveram compósitos de resina epóxi e não tecido de poliéster e foram submetidos a ensaios mecânicos a baixas temperaturas. Observaram boa adesão das fases e mudanças no comportamento de fratura com a diminuição de temperatura. Patnaik e Teijan [16, 48] desenvolveram compósitos de não tecido de manta agulhada de fibra de viscose com matriz de resina epóxi. Os compósitos foram produzidos pelo método manual (*handlay-up*), com impregnação de camadas de manta de não tecido alternadas por resina epóxi. Os compósitos apresentaram boas propriedades mecânicas, principalmente de tração e flexão, quando comparadas à matriz termorrígida, além de boa adesão da resina na manta.

Veidt[49] mostrou que a resistência à delaminação ( $G_{1C}$ ) de um compósito manufaturado com tecido agulhado de fibras de vidro e resina epóxi aumenta em cerca de 5 vezes em relação ao compósito manufaturado com o mesmo tecido sem agulhamento. Embora ocorra uma redução na resistência à tração de ~20%, no plano, para o compósito agulhado, o módulo de elasticidade praticamente permanece inalterado, enquanto que um aumento de 70% foi verificado no módulo elasticidade na direção perpendicular ao plano[49].

Compósitos laminados constituídos com quatro camadas de reforços híbridos fabricados pelo processo de laminação manual (*handlay-up*) foram estudados por Oliveira [50], tecidos híbridos com fibras de carbono AS4, kevlar 49 e vidro-E foram utilizados como reforço em matriz éster vinílica. Por exemplo, o laminado composto de tecido híbrido kevlar/carbono no ensaio de tração uniaxial com carregamento na direção da fibra de carbono mostrou acréscimo nas propriedades mecânicas ~11% na resistência e ~45% na rigidez, quando comparadas ao carregamento na direção das fibras de kevlar. [50].

Song e colaboradores [51] analisaram eletrólitos compósitos constituídos por uma mistura de diacrilato de polietileno glicol (PEGDA), poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF) e poli (metil-metacrilato) (PMMA), em conjunto com um não tecido reticulados em ultra-

violeta. Os autores mostraram que a condutividade e a resistência interfacial permaneceram quase constante, mesmo a 80° C [51]

Técnicas de obtenção de não tecidos também são utilizadas para produção de compósitos. Krzysike Youngquist[52]elaboraram compósitos de fibra de madeira/fibra de polipropileno, feitos com a tecnologia de obtenção de não tecido extrudado, *web technology*, a qual é realizado a pulverização das fibras de polipropileno sobre as fibras de madeira. O polipropileno enxertado com anidrido maleico, denominado MAPP, foi pulverizado nos teores de 1 e 3% sobre as fibras de madeira, que representam 70 e 85% dos painéis compósitos. Ambos níveis de MAPP aumentaram significativamente os resultados de tração e de flexão. O compósito com 70% de fibra de madeira teve aumento significativo na energia de impacto com 3% de MAPP. O compósito com 85% de fibra de madeira obteve melhorias em relação à resistência à água [52].

Chen e colaboradores [53] utilizaram a técnica de agulhamento para produção de compósitos C/C-Si, onde o ensaio de tração foi conduzido a 2000° C para estudar o comportamento à tração e mecanismos de falha microscópicas. Os resultados mostram que a resistência à tração, dureza e falha aumentam com o aumento da temperatura, enquanto que o módulo elástico diminui. A resistência à tração aumentou gradualmente 98,7-162,6 MPa a 1800° C e, em seguida, diminui para 154,3 MPa a 2000° C. A temperaturas elevadas, uma grande quantidade de fibras são puxados para fora, e as superfícies de fratura mostram padrões irregulares, o que indica que a resistência interfacial diminui com o aumento da temperatura. A fraca interação interfacial pode induzir um módulo de tensão inferior e pode melhorar a resistência à tração dos compósitos de C/C-SiC.

Um novo tipo de composto estrutural funcional foi preparado por intercalação de não tecidos de aramida (ANF) entre o compósito reforçado com fibra de carbono bismaleimida (BMI). Foi observado por Ni e colaboradores [54] que não tecidos de aramida intercalada melhorou significativamente o fator de perda, resistência ao cisalhamento interlaminar, resistência na fratura interlaminar, e uma influência insignificante na resistência à flexão e módulo de elasticidade do compósito co-curado. Entre eles, o fator de perda do compósito co-curado unidirecional com 15 camadas de ANF foi melhorada 108% em comparação com ao padrão e o Modo I resistência na fratura interlaminar ( $G_{IC}$ ), Modo II resistência na fratura interlaminar ( $G_{IIC}$ ) e resistência ao cisalhamento interlaminar foram melhorados 38,6%, 15,5% e 10,2%, respectivamente.

Devido uma crescente tendência na utilização de não tecidos de fibras naturais em compósitos, Andre e Ishak[55] prepararam compósitos de não tecidos orientados aleatoriamente de kenaf/epóxi com várias cargas de fibras pelo método de moldagem por transferência de resina (RTM). Foi utilizado um não tecido agulhado de fibra de kenaf (KF), kenaf é uma planta indiana utilizada pela indústria têxtil, com gramatura de  $1.100\text{gm}^{-2}$  e resina epóxi com viscosidade de mistura e densidade  $1,61\text{ Pa.s}$  e  $1,13\text{ gcm}^{-3}$ , respectivamente. Com denominações, regra das misturas (ROM) e regra de misturas modificada (MROM), foi observado que o módulo de tração dos compósitos aumentar à medida que aumenta o carregamento das fibras, tal tendência devido ao alto módulo de resistência da fibra. Verificou-se que a porcentagem de desvios de MROM foram muito menores do que ROM em qualquer carga de fibras no compósito.

Neste trabalho, dois tipos de não tecidos (PE/PP e PE/PP/PET) serão utilizados para a preparação dos compósitos de matriz de resina epóxi utilizando a moldagem manual. Foram preparados compósitos com diferentes teores de fibras e diferentes direções das mantas, e as propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas foram avaliadas e correlacionadas.

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Materiais

A matriz polimérica utilizada neste projeto foi a resina epóxi proveniente de uma combinação do diglicidil éter do bisfenol-A (DGEBA) e do epóxi novolac, com designação Epocast® 50-A1. Foi utilizado o agente endurecedor a base de trietilenotetramina (TETA), e N-[2-(imidazolidin-1-il)etil] etilenodiamina, com designação 9816®. Ambos fornecidos pela Huntsman®, as propriedades da resina epóxi, do endurecedor e da mistura entre resina e endurecedor são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades típicas dos componentes da matriz polimérica [56].

| Propriedades                   | Método de ensaio | Resina Epocast 50-A1 | Endurecedor 9816 | Sistema Resina Epocast 50-A1/9816 |
|--------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------------------------|
| Cor                            | Visual           | Âmbar                | Palha            | Âmbar                             |
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | ASTM-D-792       | 1,21                 | 1,05             | 1,18                              |
| Viscosidade à 25 °C (cP)       | ASTM-D-2196      | 7.770                | 250              | 2.400                             |
| Tempo Gel (min)                | ASTM-D-2471      | --                   | --               | 65                                |

Como cargas de reforço foram utilizados resíduos sólidos de não tecidos que são provenientes de:

- A) *Não tecidos de PE/PP*: Aureolas do corte das laterais das peças durante o processo de fabricação do não tecido. A composição dessa amostra de não tecido é de fibra bicomponente de polietileno e polipropileno (PE/PP) 87,5/12,5;
- B) *Não tecidos de PE/PP/PET*: Retalhos resultantes da partida de linha de não tecidos compostos de fibras de polietileno, polipropileno e poli(tereftalato de etileno) (PE/PP/PET) 50/15/35.

Os resíduos foram gentilmente cedidos pela Freudenberg Não Tecidos, Jacareí. A Figura 15 a 17 apresentam as imagens dos não tecidos utilizados.



Figura 15: Resíduo de não tecido disponível para descarte no aterro sanitário industrial.

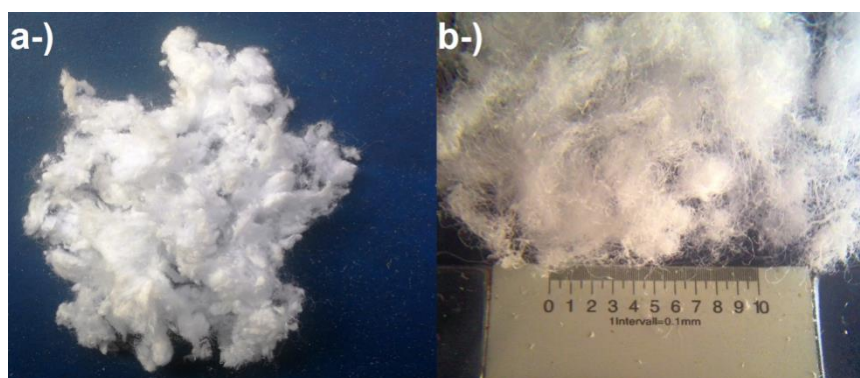


Figura 16: Resíduo de não tecido de PE/PP: a-) fibras abertas e b-) imagem ampliada 8x.

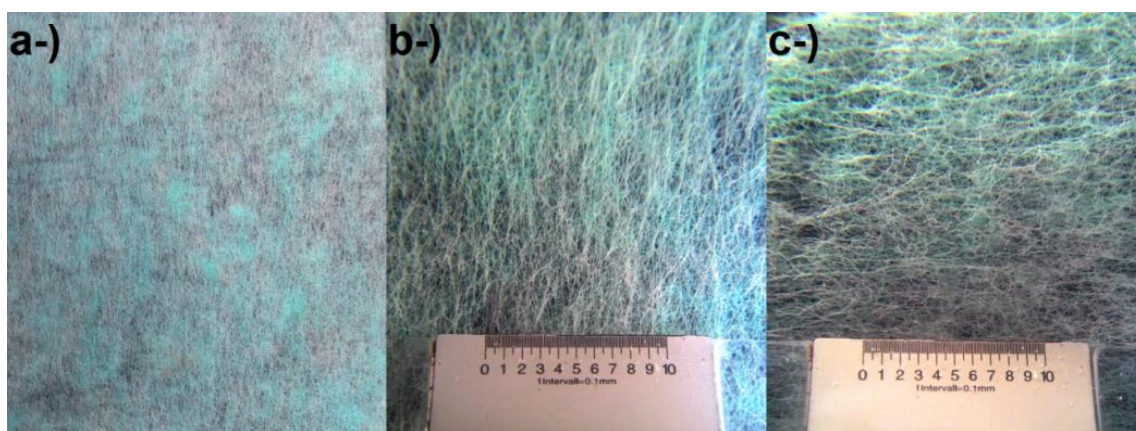


Figura 17: Resíduo de não tecido de PE/PP/PET: a-) não tecido, b-) sentido longitudinal ampliado 8x, c-) sentido transversal ampliado 8x.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Caracterização dos Resíduos de Não Tecidos

Os resíduos de não tecidos foram caracterizados através dos seguintes métodos:

- i) *Calorimetria diferencial de varredura (DSC)*: as amostras de não tecido foram caracterizadas utilizando um equipamento da TA Instruments, modelo QS 100. As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 200 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min utilizando nitrogênio como gás de arraste, permanecendo nessa temperatura por 3 minutos, em seguida foram resfriadas até a temperatura ambiente com taxa de resfriamento de 10 °C/min e novamente aquecidas até 200 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min;
- ii) *Microscopia ótica*: amostras foram submetidas a microscopia ótica utilizando um microscópio ótico da marca Zeiss, modelo AxioScope A1.

### 3.2.2 Preparação dos corpos de prova de Resina Epóxi

Para a preparação dos corpos de prova de resina epóxi foram utilizadas 100 partes em massa do monômero de epóxi Epocast® 50-A1 para 14 partes em massa do endurecedor 9816®, conforme literatura [56]. Inicialmente aqueceu-se o monômero de epóxi a 40 °C e em seguida foi adicionado o endurecedor e a mistura foi vertida no molde, a cura ocorreu por 24 h a temperatura ambiente e em seguida a resina epóxi foi desmoldada e levada a uma estufa de circulação de ar por 2 h à 77 °C.

O agente endurecedor é o responsável pela reticulação (ou cura) das cadeias do epóxi e pelas propriedades finais do termofixo. A Figura 18 apresenta as reações entre o endurecedor e o grupo epóxi. Na primeira reação, o hidrogênio da amina reage com o oxigênio do grupo epóxi causando a formação de uma amina secundária. A seguir a amina secundária reage com outro grupo epóxi até que a reação se complete e se obtenha um produto final com bom balanço de propriedades mecânicas e térmicas [30].

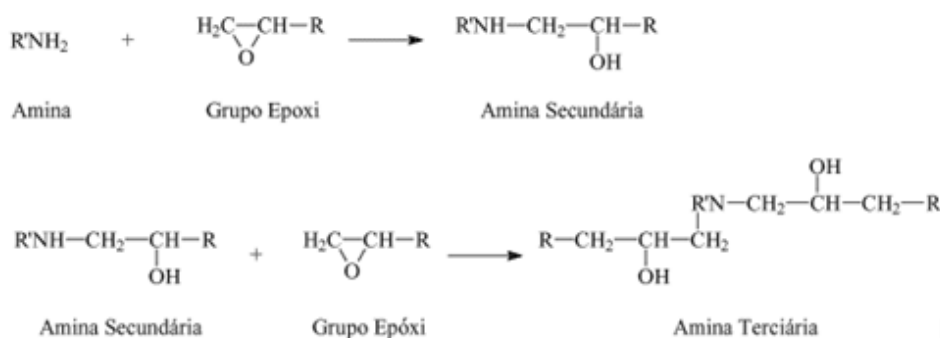


Figura 18: Reações de cura entre grupo epóxi e endurecedor [27].

### 3.2.3 Preparação dos Compósitos de Resina Epóxi/Não Tecido

Para a preparação dos compósitos utilizou-se a mesma concentração de monômero epóxi e agente endurecedor, ou seja, 100 partes em massa do monômero de epóxi Epocast® 50-A1 para 14 partes em massa do endurecedor 9816®. Os compósitos de resina/não tecidos com diferentes teores de resíduo do não tecido foram preparados através de dois métodos:

#### Compósitos de Resina Epóxi/Fibras de Não Tecidos de PE/PP

Para a produção dos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP foram utilizadas fibras abertas de não tecidos de PE/PP oriundos do descarte da indústria de não tecidos. Compósitos de resina epóxi e fibras abertas de não tecidos de PE/PP com 0,6, 1,2 e 2,4 pcr (partes por cem partes de resina), que representam 0,5, 1,0 e 2,0 % em massa respectivamente, de fibra aberta foram preparados. Inicialmente foi realizada a dispersão entre o resíduo das fibras de não tecido no monômero de epóxi aquecido a 40 °C para facilitar a homogeneização, em seguida foi adicionado o endurecedor, prosseguiu-se com a mistura e posteriormente a massa foi vertida no molde, conforme mostrado na Figura 19, a cura ocorreu por 24 h a temperatura ambiente, em seguida, os compósitos foram desmoldados e colocados em estufa de circulação de ar durante 2 h à 77 °C, para que ocorresse a cura total da resina.

Após, as placas obtidas foram cortadas utilizando uma cortadeira Dremel® 3000, com discos de corte para plástico de 3,8 mm (1-1/5”) de diâmetros no sistema EZ Lock com rotação entre 25.000 e 30.000 rpm. As dimensões dos corpos de prova seguiram as

normas ASTM D 638-8 para os corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos de tração e norma D 790-07 para os corpos de prova para os ensaios mecânicos de flexão de 3 pontas [57-58, 60].



Figura 19: Molde utilizado nos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP

### Compósitos de Resina Epóxi/Laminados de Não Tecidos de PE/PP/PET

Para a produção dos compósitos de resina epóxi/laminados de não tecidos de PE/PP/PET foi utilizado o processo de moldagem manual (*handlay-up technique*), onde contempla a disposição e empilhamento do reforço, com cada camada de reforço sobreposta e impregnada com resina pré-formulada com o agente endurecedor [31]. Inicialmente foi aquecido o monômero de epóxi a 40 °C e misturado com o endurecedor na mesma proporção que os materiais produzidos anteriormente (100:14), até completa homogeneização, com agitação suficiente para não formar bolhas, com isso o compósito ficou com teor de 1,82% de resíduo de NT em massa. Em seguida a resina epóxi foi vertida no molde (Figura 20a) e posicionado o laminado resíduo de não tecido até formar quatro camadas de resíduo impregnadas com resina epóxi (Figura 20b).

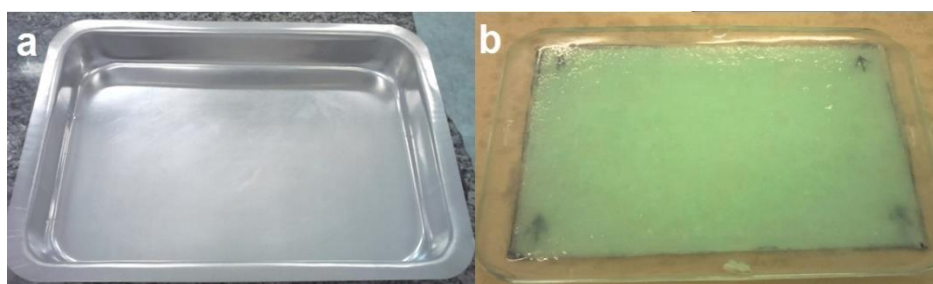


Figura 20: Preparação dos compósitos: a – molde utilizado, b – compósito laminado no sentido transversal das fibras.

Com isso, foram obtidas três estruturas de compósitos. Uma estrutura com duas camadas com sentido longitudinal das fibras e duas camadas no sentido transversal das fibras, intercaladas e denominadas *Laminado Cruzado*. Outra estrutura com as quatro

camadas do resíduo de não tecido dispostas no sentido longitudinal das fibras, essa composição foi denominada *Laminado Longitudinal* por fim uma estrutura com as quatro camadas dispostas no sentido transversal das fibras e denominadas *Laminado Transversal*, exemplificado na Figura 21. O processo de cura desses compósitos foi realizado da mesma maneira que os anteriores. Após a cura total, amostras foram cortadas para realização dos ensaios térmicos, mecânicos e avaliação da morfologia.

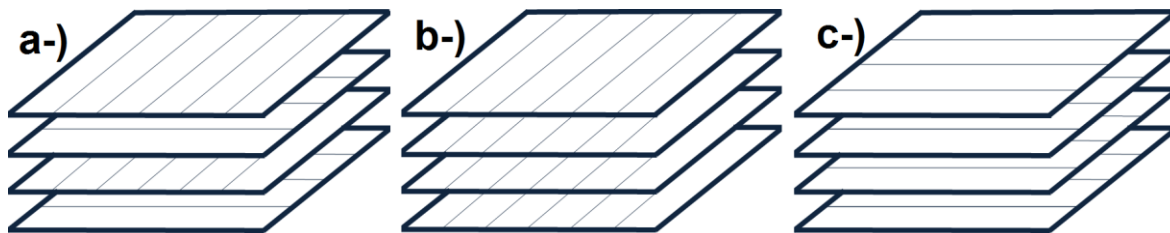


Figura 21: Exemplificação das camadas do resíduo de não tecido segundo o sentido das fibras onde: a-) sentido cruzado; b-) sentido transversal e c-) sentido longitudinal

As Figuras 22 e 23 apresentam os corpos de prova dos compósitos estudados.

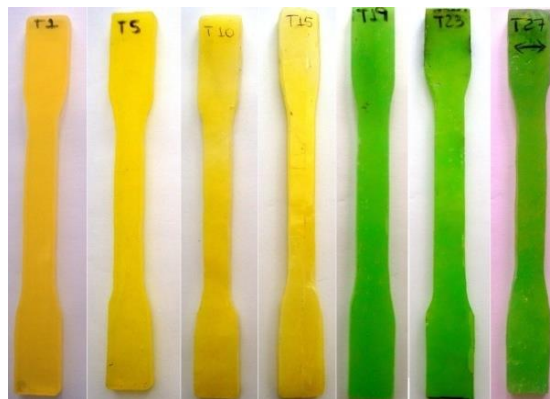


Figura 22: Corpos de prova para ensaio de tração das diversas composições estudadas, onde: epóxi puro; teor de 0,6; 1,2; 2,4; laminado sentido longitudinal; sentido cruzado e sentido transversal.

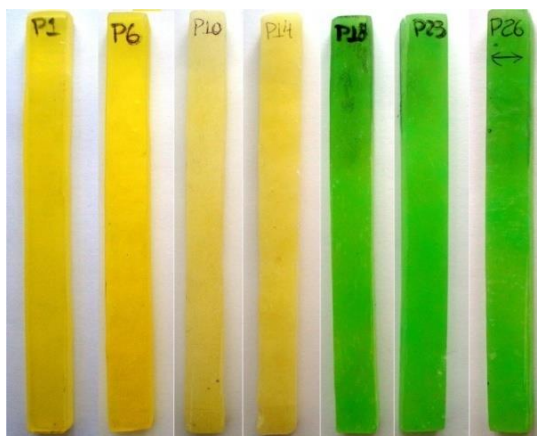


Figura 23: Corpos de prova para ensaio de flexão em 3 pontas das diversas composições estudadas, onde: epóxi puro; teor de 0,6; 1,2; 2,4; laminado sentido longitudinal; sentido cruzado e sentido transversal.

### 3.2.4 Caracterização dos compósitos

Os compósitos foram caracterizados através de ensaios térmicos, mecânicos e morfológicos.

#### 3.2.4.1 Caracterização térmica

A caracterização térmica dos diferentes compósitos e da resina epóxi foi realizada através de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e análise termogravimétrica (TGA). Análises de DSC foram realizadas utilizando um equipamento da TAINstruments, modelo QS 100. As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 200 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min utilizando nitrogênio como gás de arraste, permanecendo nessa temperatura por 3 minutos, em seguida foram resfriadas até a temperatura ambiente com taxa de resfriamento de 10 °C /min e novamente aquecidas até 200 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Análises de TGA foram realizadas utilizando um equipamento da TA Instruments, modelo QS 2000, com aquecimento da temperatura ambiente até 1000 °C, com taxa de aquecimento de 20 °C/min e atmosfera de nitrogênio.

#### 3.2.4.2 Caracterização mecânica

As amostras de resina epóxi e dos diferentes compósitos de resina epóxi/não tecido foram caracterizados através dos ensaios de tração uniaxial e flexão em 3 pontos.

Ensaio de tração uniaxial foram realizados em 6 corpos de prova utilizando uma máquina universal de ensaios EMIC, com célula de carga de 100 kN e velocidade de

subida da travessa de 5 mm/min.. Para os ensaios de flexão em 3 pontos utilizou-se uma máquina universal de ensaios Instron, modelo 4301, com célula de carga de 100 kN e velocidade de descida da travessa de 2 mm/min.. Foram ensaiados 6 corpos de prova de cada composição.

O ensaio de flexão em 3 pontos consiste na aplicação de uma carga no meio do corpo de prova, sendo que este se encontra apoiado em suas extremidades, conforme a Figura 24.

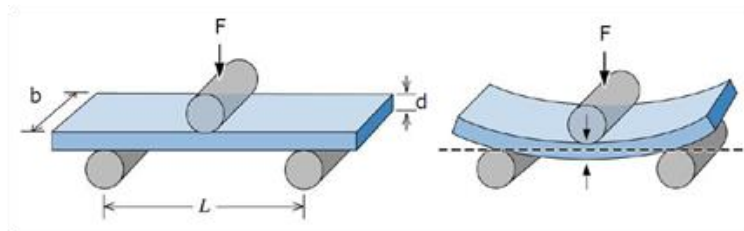


Figura 24: Ensaio de Flexão em 3 pontos [61].

A tensão de flexão pode ser calculada através da Equação 1, onde F será a carga utilizada no ensaio, L, a distância entre o apoio e a aplicação da carga, b e d são as dimensões do corpo de prova retangular.

Equação 1: 
$$\sigma = \frac{FL}{2bd^2}$$

Visto que a Equação 1 está em função da carga aplicada, a resistência à flexão é a tensão no momento da fratura. Corpos de prova padronizados foram ensaiados utilizando uma máquina universal de ensaios Instron, modelo 4301, com célula de carga de 100kN, instalada na Divisão de Materiais (AMR), no CTA. Para determinar a distância entre os apoios, foi utilizado a proporção de 1:25. A velocidade de descida da travessa foi de 2mm/min [61].

### 3.2.4.3 Caracterização morfológica

As amostras dos diferentes compósitos foram submetidos a caracterização morfológica utilizando microscopia ótica. Para tanto, as amostras foram analisadas em um microscópio ótico da marca Zeiss, modelo AxioScope A1.

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Caracterização dos Resíduos de Não Tecidos

#### 4.1.1 Não Tecidos de PE/PP

A Figura 25 apresenta os termogramas obtidos por calorimetria diferencial de varredura (DSC) da amostra de não tecido de PE/PP.

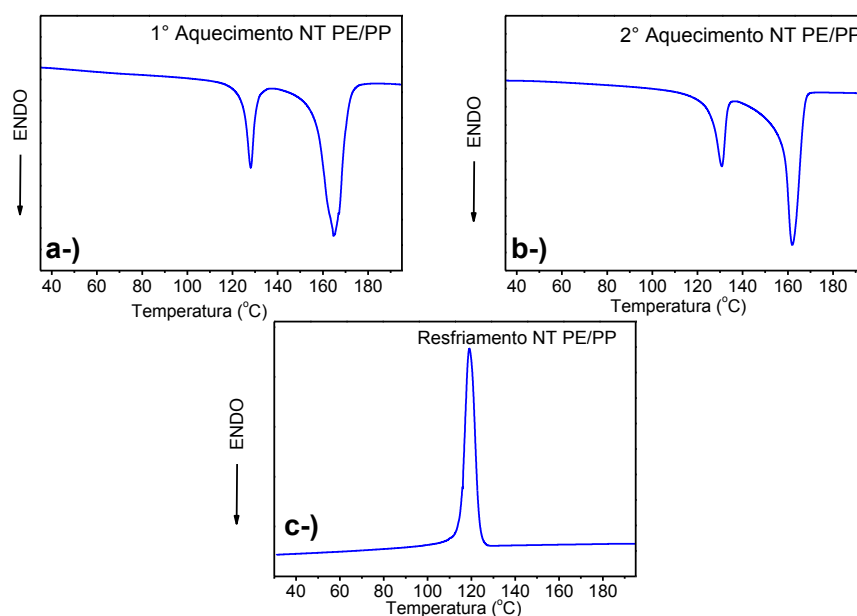


Figura 25: Termogramas obtidos por DSC do resíduo de não tecido PE/PP – 87,5/12,5: a-) 1º aquecimento, b-) 2º aquecimento e c-) resfriamento.

É possível observar a presença dos dois picos correspondentes as temperaturas de fusão cristalina do polietileno e do polipropileno que são os constituintes da fibra. Essa fibra possui composição nominal de 87,5 % em massa de PE e 12,5 % em massa de PP, conforme indicado pelo fornecedor. A Tabela 4 apresenta as temperaturas de fusão cristalina ( $T_m$ ) obtidos no primeiro e segundo aquecimento, assim como a temperatura de cristalização ( $T_c$ ) obtida durante o resfriamento, além do grau de cristalinidade. O grau de cristalinidade dos polímeros constituintes do não tecido foram determinados pela Equação 2, onde,  $X_c$  é o grau de cristalinidade,  $\Delta H_m$  é a entalpia de fusão da amostra obtida por DSC e  $\Delta H_0$  é a variação da entalpia do material 100% cristalino. O valor utilizado  $\Delta H_0$  para os polímeros PE e PP são respectivamente,  $292,6 \text{ Jg}^{-1}$  e  $138 \text{ Jg}^{-1}$ , conforme a

literatura [62, 64]. Considerou-se ainda o teor de cada componente da composição para obtenção do grau de cristalinidade.

$$\text{Equação 2: } X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100\%$$

Tabela 4: Valores da temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ), variação de entalpia e grau de cristalinidade do primeiro e segundo aquecimento e temperatura de cristalização ( $T_c$ ) obtida durante o resfriamento do não tecido de PE/PP.

| <b>1º Aquecimento</b> |                                     |              |               |                                     |              |            |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------|---------------|-------------------------------------|--------------|------------|
| <b>PE</b>             |                                     |              | <b>PP</b>     |                                     |              |            |
| $T_{m1}$ (°C)         | $\Delta H_{m1}$ (Jg <sup>-1</sup> ) | $X_{c1}$ (%) | $T_{m2}$ (°C) | $\Delta H_{m2}$ (Jg <sup>-1</sup> ) | $X_{c2}$ (%) | $T_c$ (°C) |
| 128,0                 | 18,22                               | 49,8         | 164,8         | 75,88                               | 62,8         | 119,1      |
| <b>2º Aquecimento</b> |                                     |              |               |                                     |              |            |
| <b>PE</b>             |                                     |              | <b>PP</b>     |                                     |              |            |
| $T_{m1}$ (°C)         | $\Delta H_{m1}$ (Jg <sup>-1</sup> ) | $X_{c1}$ (%) | $T_{m2}$ (°C) | $\Delta H_{m2}$ (Jg <sup>-1</sup> ) | $X_{c2}$ (%) |            |
| 130,7                 | 18,40                               | 50,3         | 162,0         | 71,55                               | 59,2         |            |

Foi possível notar apenas uma temperatura de cristalização para esse tipo de não tecido em torno de 119 °C. Além disso, pode-se notar que os constituintes do não tecido possuem alto grau de cristalinidade. O grau de cristalinidade do PE é de 50,3% enquanto que para o PP é de 59,2%.

A Figura 26 apresenta uma imagem de microscopia ótica do não tecido de PE/PP. Para o resíduo de PE/PP pode se observar nas fibras que o atrito no processo de abertura das aureolas provocou certa aspereza e/ou rugosidade na superfície das fibras, no entanto o processo se apresenta eficiente na abertura da aureola e separação das fibras, já que não foi possível observar nas imagens a ligação entre as fibras pelo processo de consolidação térmica que é utilizado na fabricação do não tecido em questão.

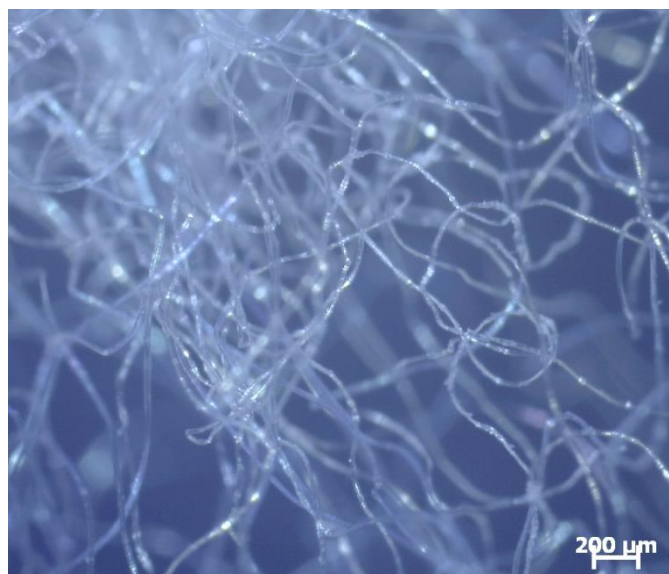


Figura 26: Imagem obtida por microscopia ótica do resíduo de não tecido de PE/PP.

#### 4.1.2 Não Tecidos de PE/PP/PET

A Figura 27 apresenta os termogramas obtidos por calorimetria diferencial de varredura (DSC) da amostra de não tecido de PE/PP/PET.

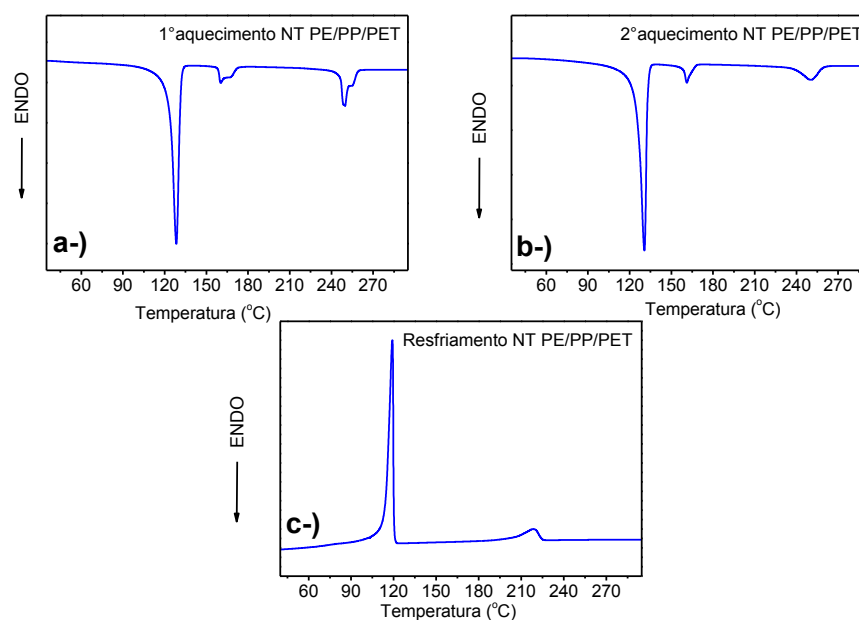


Figura 27: Termogramas obtidos por DSC do resíduo de não tecido de PE/PP/PET – 50/15/35: a-) 1º aquecimento, b-) 2º aquecimento e c-) resfriamento.

É possível observar a presença dos três picos correspondentes as temperaturas de fusão cristalina do polietileno, do polipropileno e do polietileno tereftalato (PET) que são os constituintes da fibra. Essa fibra possui composição nominal de 50 % em massa de PE, 15 % em massa de PP e 35% em massa de PET, conforme indicado pelo fornecedor. A Tabela 5 apresenta as temperaturas de fusão cristalina ( $T_m$ ) obtidos no primeiro e segundo aquecimento, assim como a temperatura de cristalização ( $T_c$ ) obtida durante o resfriamento, além do grau de cristalinidade. O grau de cristalinidade dos polímeros constituintes do não tecido foram determinados pela Equação 1. O valor utilizado  $\Delta H_0$  para os polímeros PE, PP e PET são respectivamente,  $292,6 \text{ Jg}^{-1}$ ,  $138 \text{ Jg}^{-1}$  e  $140 \text{ Jg}^{-1}$  conforme a literatura [62-64]. Considerou-se ainda o teor de cada componente da composição para obtenção do grau de cristalinidade.

Tabela 5: Valores da temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ), variação de entalpia e grau de cristalinidade do primeiro e segundo aquecimento e temperatura de cristalização ( $T_c$ ) obtida durante o resfriamento do não tecido de PE/PP/PET.

| <b>1º Aquecimento</b> |                      |          |           |                      |          |            |                      |          |       |          |
|-----------------------|----------------------|----------|-----------|----------------------|----------|------------|----------------------|----------|-------|----------|
| <b>PE</b>             |                      |          | <b>PP</b> |                      |          | <b>PET</b> |                      |          |       |          |
| $T_{m1}$              | $\Delta H_{m1}$      | $X_{c1}$ | $T_{m2}$  | $\Delta H_{m2}$      | $X_{c2}$ | $T_{m3}$   | $\Delta H_{m3}$      | $X_{c3}$ | $T_c$ | $T_{c2}$ |
| (°C)                  | ( $\text{Jg}^{-1}$ ) | (%)      | (°C)      | ( $\text{Jg}^{-1}$ ) | (%)      | (°C)       | ( $\text{Jg}^{-1}$ ) | (%)      | (°C)  | (°C)     |
| 128,4                 | 86,87                | 59,4     | 160,3     | 10,78                | 52,2     | 250,0      | 20,71                | 42,3     | 218,1 | 119,1    |
| <b>2º Aquecimento</b> |                      |          |           |                      |          |            |                      |          |       |          |
| <b>PE</b>             |                      |          | <b>PP</b> |                      |          | <b>PET</b> |                      |          |       |          |
| $T_{m1}$              | $\Delta H_{m1}$      | $X_{c1}$ | $T_{m2}$  | $\Delta H_{m2}$      | $X_{c2}$ | $T_{m3}$   | $\Delta H_{m3}$      | $X_{c3}$ |       |          |
| (°C)                  | ( $\text{Jg}^{-1}$ ) | (%)      | (°C)      | ( $\text{Jg}^{-1}$ ) | (%)      | (°C)       | ( $\text{Jg}^{-1}$ ) | (%)      |       |          |
| 130,6                 | 112,2                | 76,7     | 161,2     | 6,76                 | 32,6     | 250,8      | 14,71                | 30,0     |       |          |

Observa-se a presença de dois picos de cristalização, o primeiro (218 °C) correspondente a cristalização do PET e o segundo (119 °C) correspondente a cristalização das poliolefinas. As fases dos não tecidos apresentam elevados graus de cristalinidade. Não foram observadas grandes modificações das temperaturas de fusão cristalina para os dois aquecimentos. Essas observações foram importantes para caracterizar as fases presentes e para garantir que após o processamento dos compósitos as fibras se manterão integras, pois não serão atingidas as temperaturas de fusão cristalina dos materiais constituintes dos resíduos.

A Figura 28 apresenta a imagem de microscopia ótica do resíduo de PE/PP/PET. É possível observar as ligações das fibras bicomponente tipo núcleo/corona, que possui o polímero de menor temperatura de fusão cristalina na coroa. Ou seja, a parte externa das fibras bicomponentes é composta de PE, conforme observado nos resultados de DSC a temperatura de fusão cristalina é  $\sim 128$  °C. Isso favorece o processo de consolidação térmica do não tecido em questão por ser necessário menos energia para ativação do polímero para que as ligações entre as fibras ocorram.

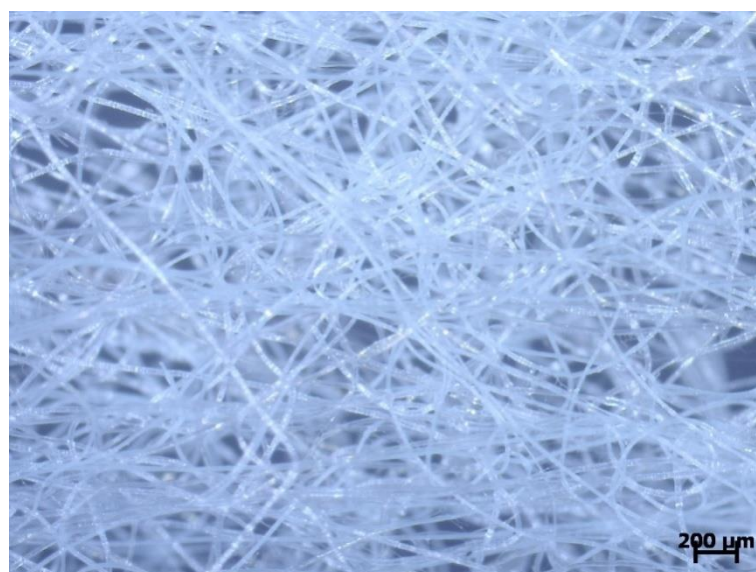


Figura 28: Imagem obtida por microscopia ótica do resíduo de não tecido de PE/PP/PET.

## **4.2 Avaliação das Propriedades Térmicas, Mecânicas e Morfológicas dos Compósitos de Resina Epóxi/Fibras de Não Tecidos de PE/PP**

### **4.2.1 Avaliação Térmica**

Buscando compreender a influência da adição das fibras de não tecidos de PE/PP na temperatura de transição vítrea da resina epóxi, primeiramente analisou-se as curvas do primeiro e segundo aquecimento dessa resina. A Figura 29 apresenta os termogramas obtidos por DSC da resina epóxi.

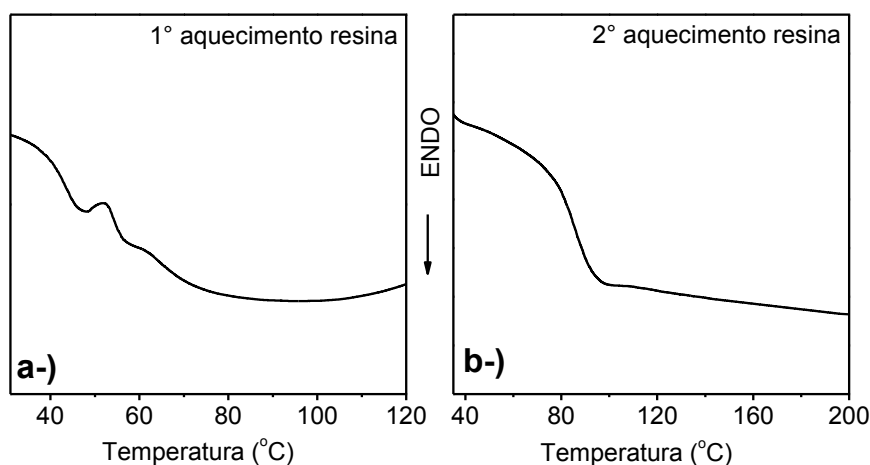


Figura 29: Termogramas - 1º e 2º aquecimentos da resina epóxi.

Na curva do primeiro aquecimento é possível observar que a temperatura de transição vítrea está na ordem de 44,2 °C e observa-se ainda um ombro nessa temperatura que pode estar relacionado com a cura residual desse termofixo, ao aplicar temperatura. No segundo aquecimento nota-se que ocorreu todo o processo de cura dessa resina e a temperatura de transição vítrea aumentou para 84,6 °C, valor próximo ao repostado na literatura e pelo fabricante da resina epóxi [56].

As Figuras 30 a 32 apresentam os termogramas de DSC dos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP com 0,6, 1,2 e 2,4pcr de resíduo de não tecido. Os não tecidos de PE/PP serão designados como NT. Os resultados obtidos para os materiais desenvolvidos estão mostrados na Tabela 6.

É possível observar pelos termogramas de aquecimento obtidos por DSC a presença da transição vítrea ( $T_g$ ) correspondente a transição vítrea da matriz epoxídica e também as temperaturas de fusão cristalina das fibras de não tecidos de PE/PP. Uma vez que o processo de produção desses compósitos foi realizado abaixo das temperaturas de fusão cristalina dos componentes da fibra, na Tabela 6 são mostrados apenas os valores de  $T_m$ , sem a necessidade do cálculo do grau de cristalinidade pois esse se manteve durante o processo.

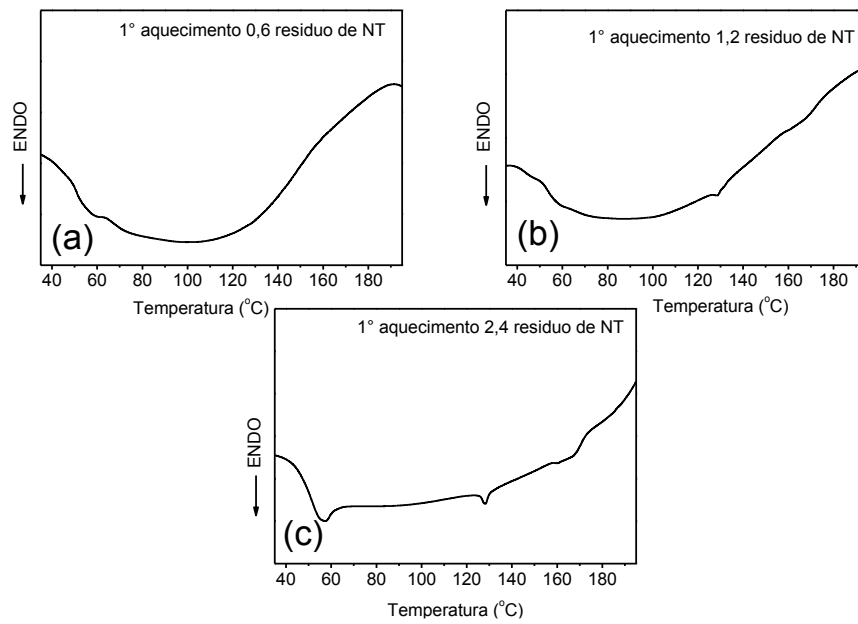


Figura 30: Termogramas do 1° aquecimento obtidos por DSC: a) 0,6 pcr de residuo de NT, b) 1,2 pcr de residuo de NT, c) 2,4 pcr de residuo de NT.

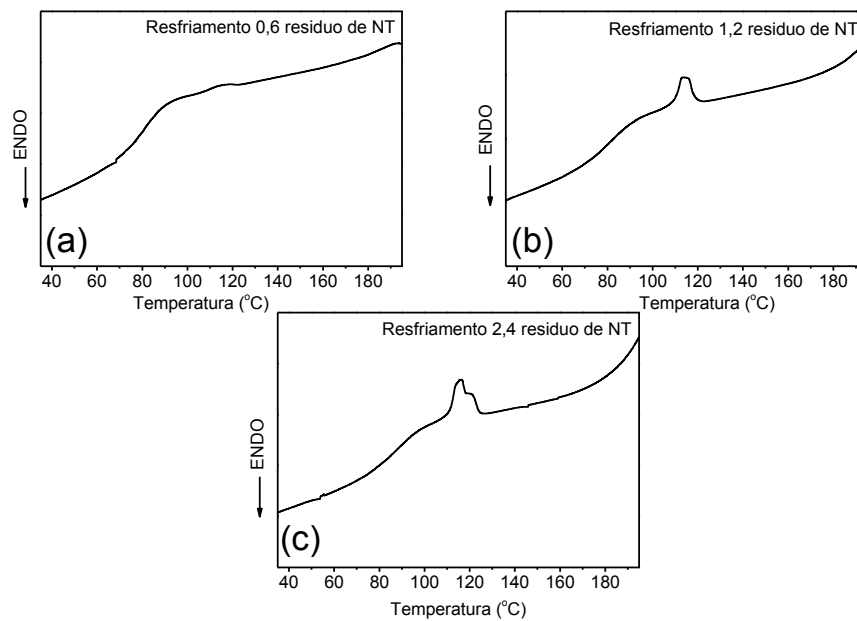


Figura 31: Termogramas de resfriamento obtidos por DSC:: a) 0,6 pcr de residuo de NT, b) 1,2 pcr de residuo de NT, c) 2,4 pcr de residuo de NT.

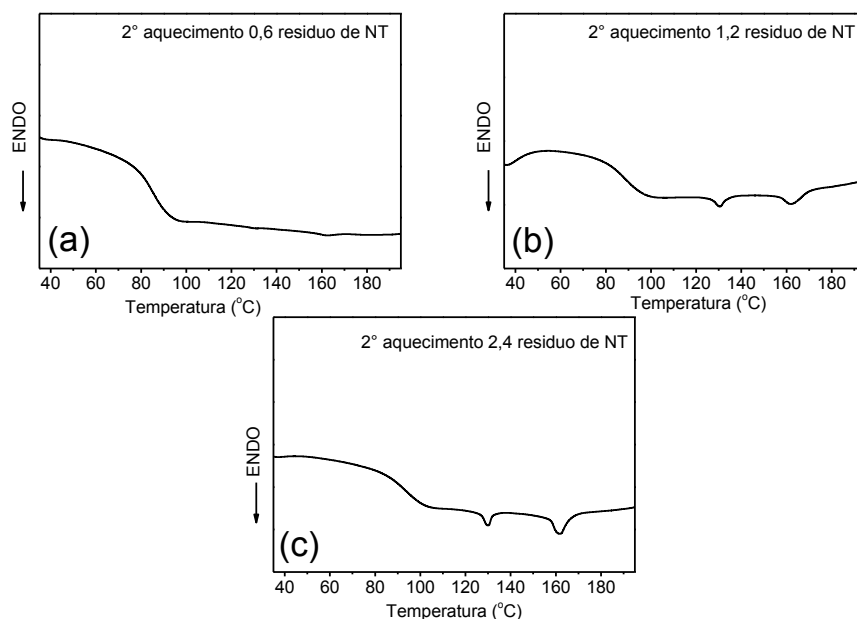


Figura 32: Termogramas do 2º aquecimento obtidos por DSC: a) 0,6 pcr de resíduo de NT, b) 1,2 pcr de resíduo de NT, c) 2,4 pcr de resíduo de NT.

Nos termogramas pode se observar os picos característicos dos polímeros presentes no reforço do compósito que ficam mais expressivos nos compósitos com 1,2 e 2,4 pcr de resíduo de não tecido.

Tabela 6: Propriedades térmicas obtidas por DSC da resina epóxi pura e dos compósitos de resina epóxi/fibra PE/PP de não tecido com diferentes teores de resíduo.

| Amostra | 1º Aquecimento |                      |                      | Resf. | 2º Aquecimento |                      |                      |
|---------|----------------|----------------------|----------------------|-------|----------------|----------------------|----------------------|
|         | Tg (°C)        | T <sub>m1</sub> (°C) | T <sub>m2</sub> (°C) |       | Tg (°C)        | T <sub>m1</sub> (°C) | T <sub>m2</sub> (°C) |
| Epóxi   | 44,2           | ---                  | ---                  | ---   | 84,6           | ---                  | ---                  |
| 0,6 NT  | 50,7           | ---                  | ---                  | ---   | 84,9           | ---                  | ---                  |
| 1,2 NT  | 54,1           | 128,8                | 164,2                | 113,2 | 87,7           | 130,6                | 162,1                |
| 2,4 NT  | 50,8           | 128,3                | 157,0                | 116,0 | 94,3           | 130,1                | 162,0                |

De maneira geral, nota-se que o aumento da quantidade de não tecido nos compósitos poliméricos aumenta a temperatura de transição vítrea da resina epóxi. Esse aumento torna-se mais significativo para maiores teores de resíduo na composição, sendo observado um aumento de aproximadamente 10 °C para composição que possuía 2,4 pcr de não tecido em sua composição. Os valores de transição vítrea do segundo aquecimento

são maiores que os obtidos no primeiro aquecimento decorrente da totalreticulação do sistema com a aplicação de temperatura. Esses resultados mostram que os sistemas deverão sofrer um processo de pós-cura posterior em estufa por um período de tempo superior ao utilizado nesse trabalho e especificado pelos fornecedores.

Os resultados da análise termogravimétrica da resina epóxi e dos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP com diferentes teores de resíduo são mostrados a seguir. A Figura 33 apresenta a análise termogravimétrica da resina epóxi, assim como a derivada da curva.

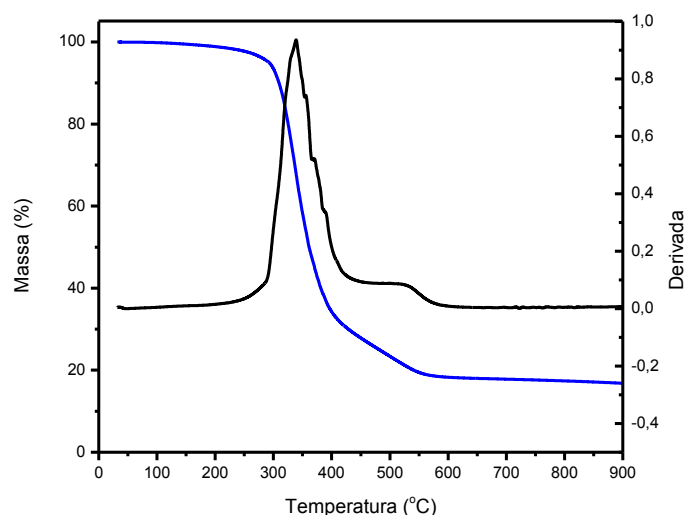


Figura 33: Análise termogravimétrica da resina epóxi.

As Figuras 34 a 36 apresentam as curvas obtidas por TGA dos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP com diferentes teores de fibra.

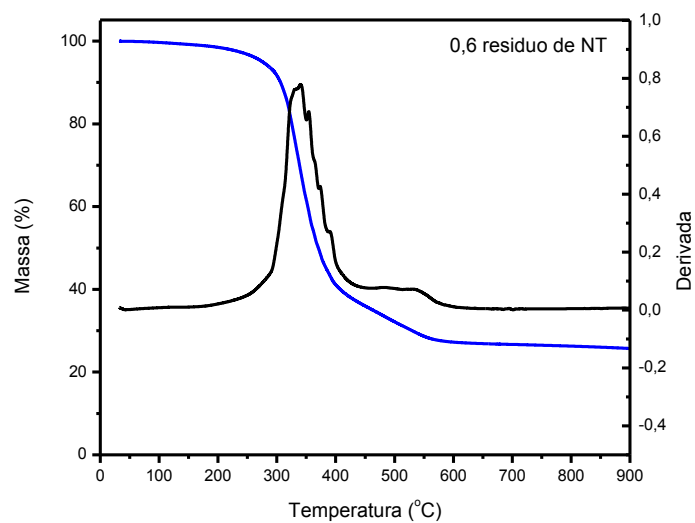


Figura 34: Análise termogravimétrica do compósito de resina epóxi/fibra de não tecido de PE/PP com 0,6% em massa de fibra.

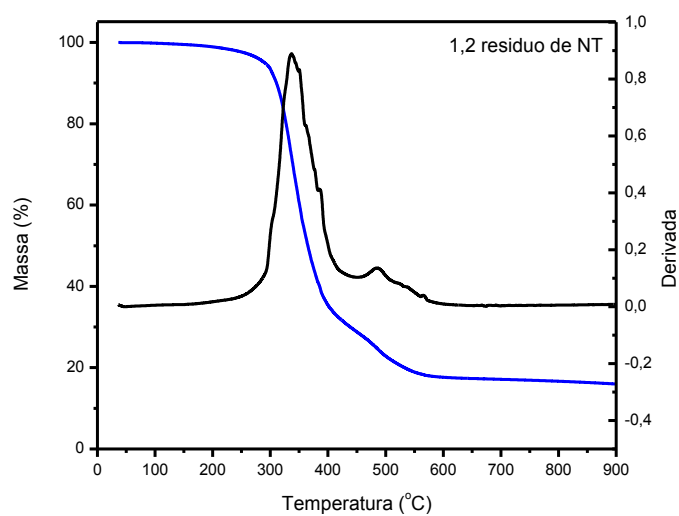


Figura 35: Análise termogravimétrica do compósito de resina epóxi/fibra de não tecido de PE/PP com 1,2% em massa de fibra.

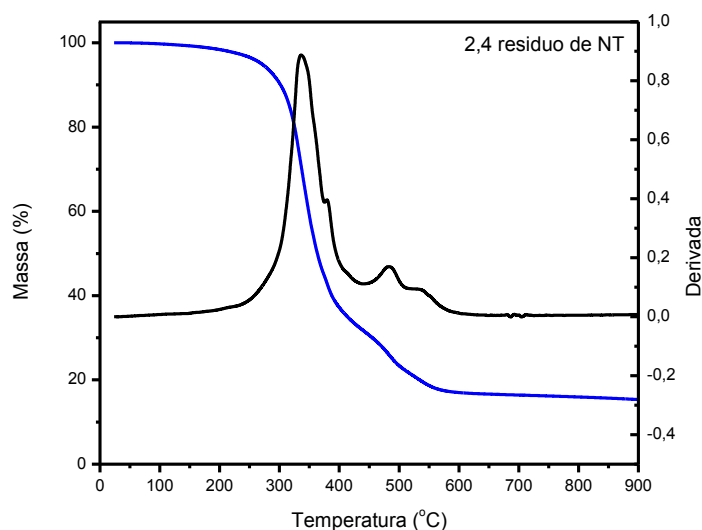


Figura 36: Análise termogravimétrica do compósito de resina epóxi/fibra de não tecido de PE/PP com 2,4% em massa de fibra.

As derivadas das curvas termogravimétricas apresentaram duas etapas de degradação térmica, a primeira com o início da degradação térmica onde ocorre a maior perda de massa entre 285 °C e 435 °C e a segunda etapa de degradação ocorrem na faixa de 445 °C e 590 °C. A presença de fosfato de triquesilo e aminas no endurecedor podem ter formados complexos inorgânicos residuais. Segundo a literatura [65-66], a decomposição térmica de uma resina epóxi, semelhante a utilizada nesse trabalho, apresentou a 350 °C a decomposição de alguns componentes voláteis como metilciclopentadieno, dióxido de carbono, água, monóxido de carbono e hidrogênio que são liberados e são responsáveis pela rápida queda da curva. A 450 °C outros produtos voláteis são decompostos, como o metilciclopentadieno, dióxido de carbono, monóxido de carbono e ciclopentadieno. A partir de 475 °C ocorre a decomposição dos compostos fenólicos, observa-se ainda que há um grande teor de resíduo (aproximadamente 16%) que é resultado da queima da resina epóxi e é constituído de carbono, provavelmente na forma de grafite, decorrente da grande quantidade de anéis benzênicos presentes na resina epóxi.

A Figura 37 apresenta um comparativo da análise termogravimétrica das composições estudadas e os resultados da temperatura de início de decomposição térmica irreversível e dos teores de resíduo são apresentados na Tabela 7.

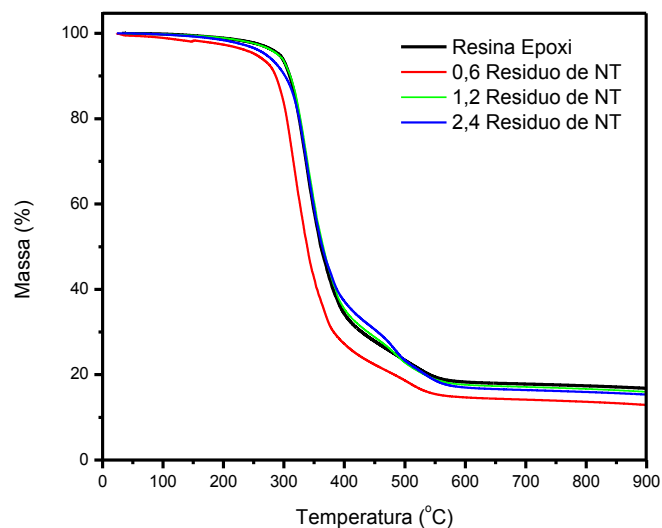


Figura 37: Análise termogravimétrica da resina epóxi pura e dos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP com diferentes teores de fibras.

Tabela 7: Temperatura de degradação térmica e teor de resíduo da resina epóxi e dos compósitos de resina epóxi/fibra de não tecidos de PE/PP com diferentes teores de fibra.

| Amostra              | Temperatura de início de degradação (°C) | Teor de resíduo (%) |
|----------------------|------------------------------------------|---------------------|
| Resina epóxi         | 307                                      | 16,8                |
| 0,6 de Resíduo de NT | 290                                      | 13,0                |
| 1,2 de Resíduo de NT | 309                                      | 16,0                |
| 2,4 de Resíduo de NT | 309                                      | 15,3                |

Pode-se observar pequena variação na temperatura de início de degradação irreversível, ocorrendo uma diminuição para a amostra com 0,6% pcr do resíduo de não tecido de PE/PP, no entanto, a temperatura de degradação se manteve constante para as demais composições. É muito provável que isso ocorra devido ao processo de obtenção do compósito, onde permite a presença de frações volumétricas de vazios cerca de 15% segundo a literatura [13].

#### 4.2.2 Avaliação Mecânica

A Figura 38 apresenta as curvas de tração uniaxial da resina epóxi e dos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP com 0,6, 1,2 e 2,4 pcr de resíduo. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para esses compósitos.

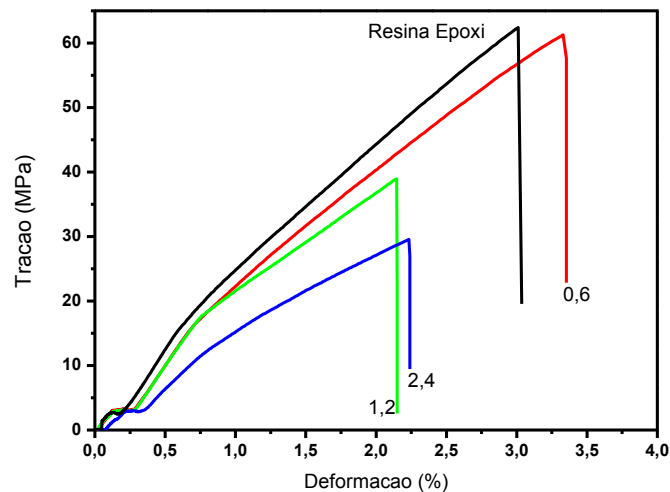


Figura 38: Curvas de tração nas composições: 0,6 resíduo de NT; 1,2 resíduo de NT; 2,4 resíduo de NT e resina epóxi.

Tabela 8: Resultados dos ensaios de tração da resina epóxi e diferentes teores de resíduo de NT.

| Amostra | Tensão Máxima (MPa) | Deformação na Ruptura (%) | Módulo Elástico (GPa) |
|---------|---------------------|---------------------------|-----------------------|
| Epóxi   | 55,9 ± 5,5          | 3,16 ± 0,38               | 1,01 ± 0,25           |
| 0,6     | 55,8 ± 3,7          | 3,35 ± 0,43               | 1,17 ± 0,09           |
| 1,2     | 40,5 ± 2,4          | 2,12 ± 0,18               | 1,23 ± 0,07           |
| 2,4     | 24,8 ± 7,8          | 1,63 ± 0,40               | 0,86 ± 0,12           |

Analisando os resultados de tração uniaxial da resina epóxi pura, observa-se que esse material possui fratura frágil, característico dos materiais termofixos. Além disso, a resina epóxi apresenta um elevado módulo elástico ( $\sim 1$  GPa). A adição das fibras de não tecidos na composição aumenta o módulo elástico para 0,6 e 1,2 pcr de fibras de não tecidos e ocorre uma diminuição com a adição de 2,4 pcr de resíduos de não tecidos.

O resíduo em forma de fibras de não tecidos de PE/PP apresentam-se de forma bastante irregular, com baixa densidade e grande volume das fibras. Assim, a adição de 2,4 pcr de resíduos (2% em massa da composição) com elevado volume dificulta a molhabilidade dessas fibras pela resina epóxi. A redução da molhabilidade das fibras é responsável pela formação de fracas interfaces entre matriz e reforço, além da formação de macros e micro vazios. A presença desses vazios diminui consideravelmente o módulo elástico do compósito, além de fragilizar o material. Este fato pode ser comprovado pela diminuição da tensão máxima e também pela diminuição da deformação na ruptura dos compósitos com elevados teores de resíduo de não tecido.

Dessa forma, utilizando o método de processo por moldagem manual e sem a adição de aditivos que possam reduzir a viscosidade da resina epóxi e propiciar maior molhabilidade da resina nas fibras, há um teor ótimo de adição de resíduo em torno de 1,2 pcr de resíduo de não tecido (aproximadamente 1% em massa) em que obteve-se um ganho de 23% no módulo elástico, comparado a resina epóxi pura. A adição de 0,6 pcr de resíduo (aproximadamente 0,5% em massa da composição) também propiciou melhora no módulo elástico em cerca de 17% em comparação a resina epóxi pura.

Uma forma de melhorar as propriedades mecânicas desses compósitos pode ser a utilização de agentes para melhorar a interface e utilização de outros processos, como a moldagem á vácuo, para diminuir a quantidade de microvazios e garantir o maior reforçamento. Uma vez que a proposta desse trabalho é a obtenção de compósitos de resina epóxi/não tecidos de baixo custo e com boas propriedades, recomenda-se a utilização de menores teores de carga, para obtenção de propriedades que sejam superiores a resina epóxi pura.

A Figura 39 apresenta as curvas obtidas no ensaio de flexão em três pontos dos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP com 0,6, 1,2 e 2,4 pcr de resíduo e da resina epóxi. A Tabela 09 apresenta os resultados obtidos para a resina epóxi e para os compósitos de resina epóxi/fibras de não tecido e as Figuras 40 e 41 apresentam gráficos comparativos dos resultados obtidos para os materiais estudados.

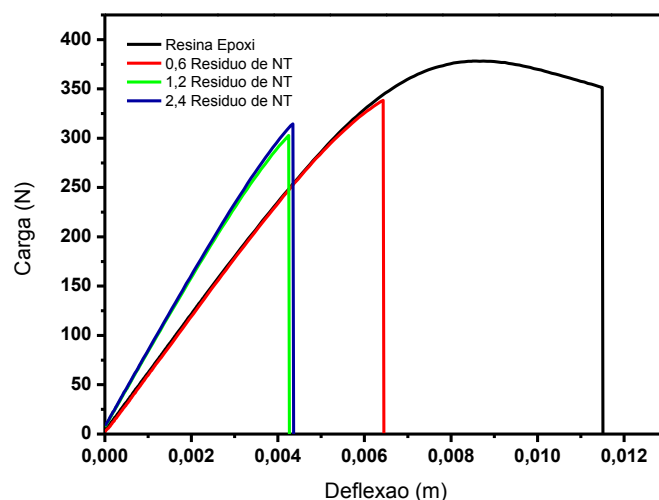


Figura 39: Curvas de deflexão obtidas pelo ensaio de flexão em três pontos nas composições: 0,6 resíduo de NT; 1,2 resíduo de NT, 2,4 resíduo de NT e Resina Epóxi.

Tabela 9: Resultados dos ensaios de flexão em três pontos da resina epóxi e dos compósitos com diferentes teores de resíduo de NT.

| Amostra      | Módulo de Flexão (GPa) | Resistência Máxima a Flexão (MPa) |
|--------------|------------------------|-----------------------------------|
| Resina Epóxi | 63,8 ± 5,9             | 30,4 ± 2,4                        |
| 0,6pcr NT    | 57,5 ± 6,3             | 24,8 ± 1,3                        |
| 1,2pcr NT    | 81,0 ± 6,6             | 20,5 ± 2,6                        |
| 2,4pcr NT    | 93,9 ± 9,0             | 16,9 ± 2,2                        |

Observa-se uma diminuição gradativa da resistência máxima à flexão dos compósitos com a adição de maiores teores de resíduo de não tecido, por outro lado, ocorreu aumento significativo do módulo de flexão com o aumento da quantidade de resíduo de não tecido.

O ensaio de flexão em três pontos se difere do ensaio de tração pois no corpo de prova atuam forças compressivas e tracionais. A presença de microvazios no compósito faz com que a distribuição de tensão não seja uniforme na amostra, além disso, uma quantidade relativamente grande de fibras na composição pode prejudicar a reticulação total da amostra, havendo ainda certa quantidade de monômero residual que podem afetar as propriedades. Essa afirmação está relacionada com a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) desses materiais que

apresentaram aumento nessa temperatura após um segundo aquecimento, o que significa que ainda havia traços de monômero residual. Assim, quanto mais fibra de não tecido presente na composição, menor a distribuição de tensão na amostra e consequentemente menor a resistência máxima a tração.

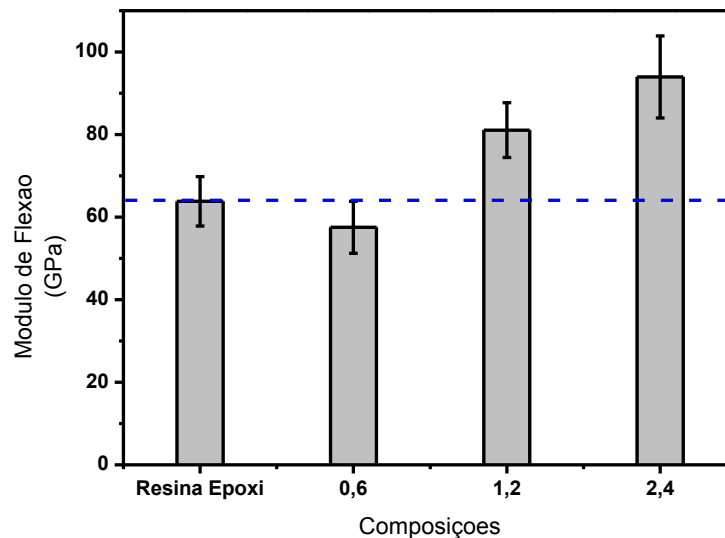


Figura 40: Módulo de Flexão nas composições: 0,6 resíduo de NT; 1,2 resíduo de NT, 2,4 resíduo de NT e Resina Epóxi.

Por outro lado, ao aplicar força compressiva nesses corpos de prova com maior quantidade de microvazios, o comportamento se altera. Observa-se um aumento no módulo de flexão para maiores teores de não tecido em relação a resina epóxi pura. As fibras de não tecido não estão orientadas na amostra, consequência da própria natureza dessa fibra. Ao aplicar as forças compressivas em amostras que possuem grande quantidade de vazios evitam que a trinca, que pode iniciar no próprio vazio, se propague aumentando o módulo de flexão. Assim, para o compósito com 2,4 pcr de não tecido de PE/PP, com maior quantidade de microvazios, obteve-se aumento de 47% do módulo de flexão em relação à resina epóxi pura.

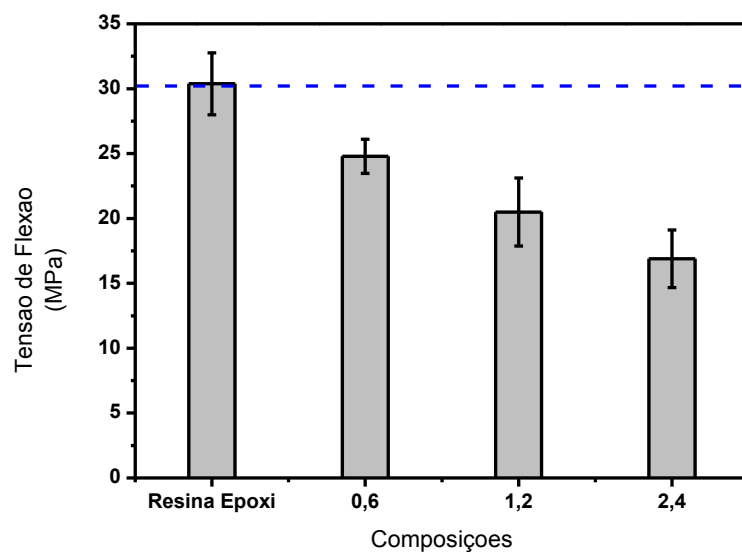


Figura 41: Tensão de Flexão nas composições: 0,6 resíduo de NT; 1,2 resíduo de NT, 2,4 resíduo de NT e Resina Epóxi.

### 4.2.3 Avaliação Morfológica

As Figuras 42 a 44 apresentam as imagens de microscopia ótica dos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP com 0,6, 1,2 e 2,4 partes em massa de resíduo de não tecido.

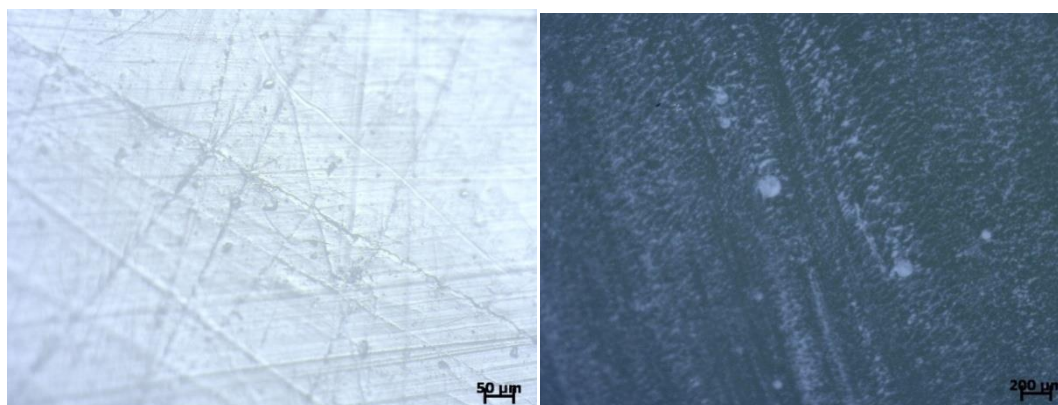


Figura 42: Microscopia ótica do compósito de resina epóxi com 0,6 pcr de não tecido de PE/PP.

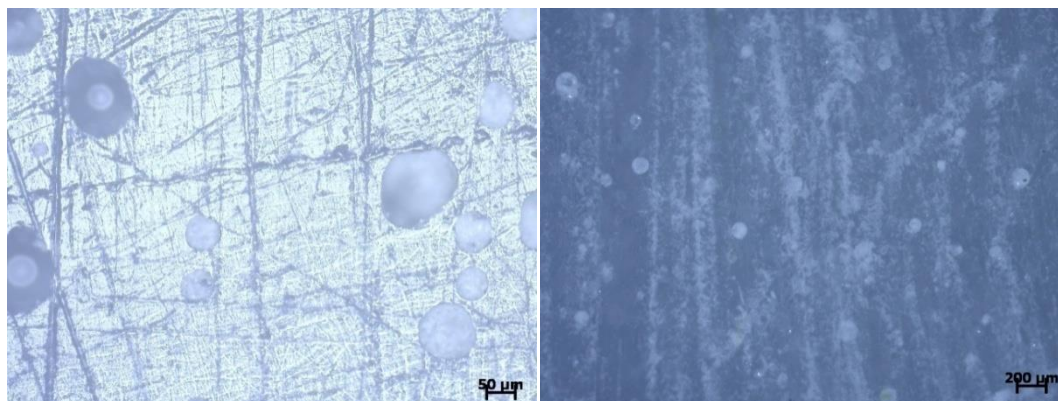


Figura 43: Microscopia ótica do compósito de resina epóxi com 1,2 pcr de não tecido de PE/PP.

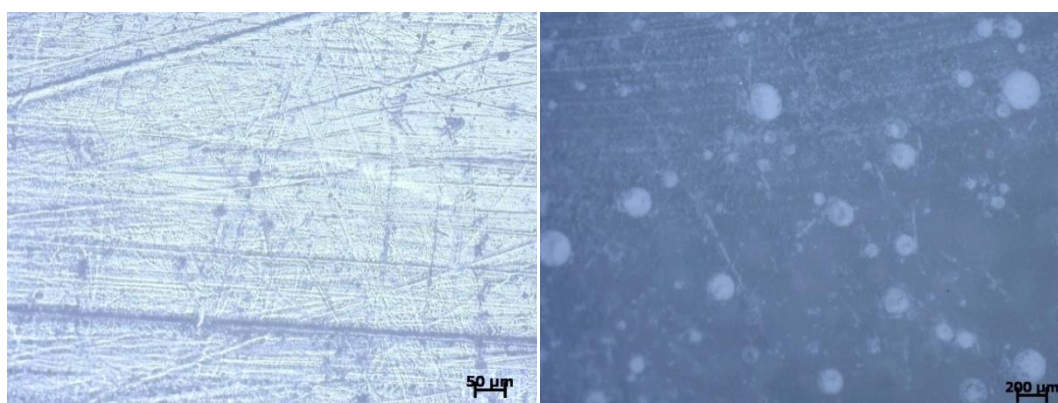


Figura 44: Microscopia ótica do compósito de resina epóxi com 2,4 pcr de não tecido de PE/PP.

É possível observar para todos os compósitos preparados a presença das fibras de não tecido que estão aleatoriamente dispersas na matriz de resina epóxi. Além disso, é possível observar a presença de bolhas e microvazios nas composições. Essas bolhas são decorrentes do processamento adotado e utilizado para a preparação dos compósitos. Aumentando-se o teor de fibras nas composições observa-se um aumento significativo da presença de microvazios nessas composições.

#### 4.2.4 Correlação entre propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas

Com relação aos ensaios realizados, pode-se afirmar, que mesmo o reforço sendo um residual da indústria de não tecido e passando por um processo mecânico de abertura para que fique no estado fibroso, a utilização desse resíduo como agente de reforço para a

resina epóxi pode ser uma alternativa para diminuição da quantidade de descarte desse produto.

Através da análise térmica confirmou-se aumento na temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do compósito com a adição de resíduo de não tecido de PE/PP, sem afetar a temperatura de início de degradação térmica irreversível dos compósitos. As propriedades mecânicas também foram bastante influenciadas pela adição de resíduo, onde observou-se aumento do módulo elástico e do módulo de flexão para as amostras com 0,6 e 1,2 pcr de não tecido de PE/PP. A morfologia foi bastante afetada pela presença das fibras de não tecido, uma vez que são leves e de grande volume, dificultaram a molhabilidade e isso ocasionou a formação de uma grande quantidade de vazios nas composições, o que influencia nas propriedades térmicas e mecânicas

### **4.3 Avaliação das Propriedades Térmicas, Mecânicas e Morfológicas dos Compósitos de Resina Epóxi/Laminados de Não Tecidos de PE/PP/PET**

#### **4.3.1 Avaliação Térmica**

Foram preparadas amostras com a mesma quantidade de laminados de não tecidos de PE/PP/PET, que possuem uma direção preferencial, em que as camadas foram dispostas na direção longitudinal do puxamento dos laminados, transversal ao puxamento dos laminados e intercaladas, denominadas cruzadas. Uma vez que a quantidade de laminados utilizados foi a mesma para todas as composições. Apenas o compósito denominado “longitudinal” foi avaliado termicamente por ensaio de DSC e TGA. A Figura 45 apresenta os termogramas de DSC do compósito de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET. A Tabela 10 apresenta as propriedades térmicas obtidas por este ensaio para o compósito desenvolvido.

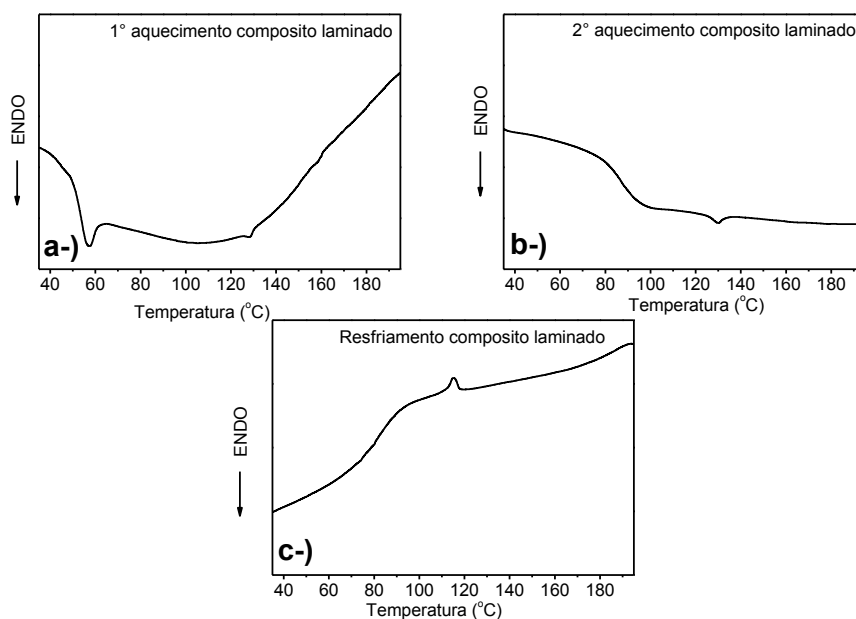


Figura 45: Termogramas do compósito laminado: a-) 1º aquecimento, b-) 2º aquecimento e c-) resfriamento.

Tabela 10: Propriedades térmicas obtidas por DSC da resina epóxi pura e dos compósitos de resina epóxi/laminado de não tecido de PE/PP/PET.

| Amostra  | 1º Aquecimento |                      | Resf.               | 2º Aquecimento |                      |
|----------|----------------|----------------------|---------------------|----------------|----------------------|
|          | Tg (°C)        | T <sub>m1</sub> (°C) | T <sub>c</sub> (°C) | Tg (°C)        | T <sub>m1</sub> (°C) |
| Epóxi    | 44,2           | ---                  | ---                 | 84,6           | ---                  |
| Laminado | 53,3           | 128,6                | 115,0               | 86,9           | 130,0                |

Foi possível determinar a temperatura de transição vítrea (Tg) do compósito de resina epóxi/laminado de não tecido de PE/PP/PET e também a temperatura de fusão cristalina do componente majoritário do laminado, o polietileno de alta densidade, que está em torno de 128 °C. Por estar em pequena quantidade no laminado, os picos relativos aos demais componentes do laminado não foram detectados. Na curva de resfriamento foi possível observar a temperatura de cristalização do laminado.

No que concerne a Tg do compósito, resultados similares aos dos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos foram observados. Ocorreu um pequeno aumento na Tg do compósito em relação a resina epóxi pura e a Tg obtida no segundo aquecimento apresentou valor superior devido a cura total ocasionada pela presença de monômeros residuais de resina epóxi no compósito. Vale ressaltar que o processamento foi realizado a

temperaturas inferiores a temperatura de amolecimento e fusão dos constituintes do laminado de não tecido, assim esses se mantêm íntegros no compósito.

A Figura 46 apresenta a curva obtida por TGA do compósito de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET. Uma vez que a quantidade de laminado foi a mesma em massa de não tecido e resina epóxi para todos os compósitos laminados, variando-se apenas a direção do não tecido entre as camadas, realizou-se apenas a análise nas amostras do *Laminado Longitudinal*. A Figura 47 apresenta um comparativo entre a resina epóxi pura e o compósito *Laminado Longitudinal* os resultados obtidos por esta técnica estão apresentados na Tabela 11.

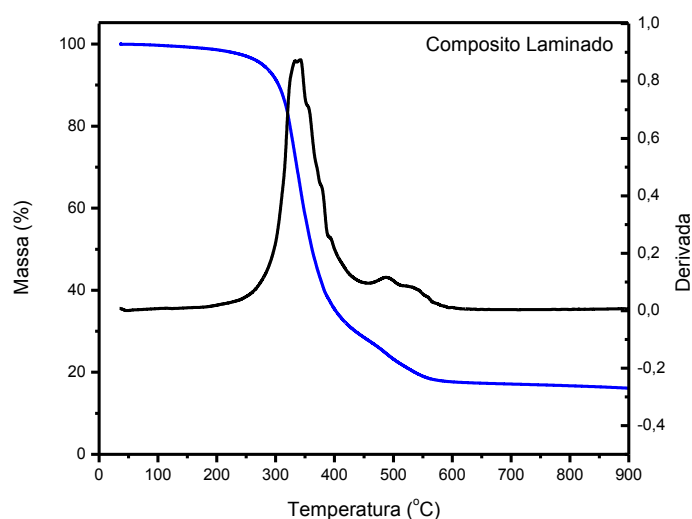


Figura 46: Análise termogravimétrica do compósito de resina epóxi/laminado de não tecido de PE/PP/PET.

Tabela 11: Temperatura de início de degradação térmica e teor de resíduo da resina epóxi e do compósito de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET.

| Amostra            | Temperatura de início de degradação (°C) | Teor de resíduo (%) |
|--------------------|------------------------------------------|---------------------|
| Resina epóxi       | 307                                      | 16,8                |
| Compósito Laminado | 305                                      | 16,1                |

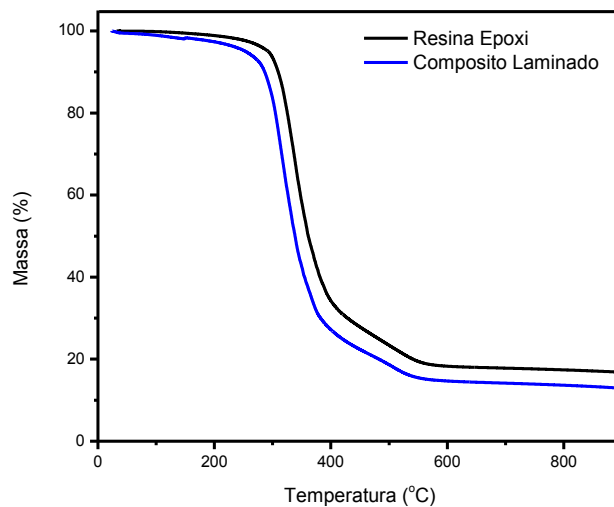


Figura 47: Análise termogravimétrica da resina epóxi pura e do compósito de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET.

De maneira análoga aos compósitos de resina epóxi/fibras de não tecidos de PE/PP, não foram observadas mudanças significativas na temperatura de início de degradação térmica irreversível nos compósitos de resina epóxi/laminados de não tecidos de PE/PP/PET. A elevada temperatura de início de degradação térmica desses compósitos é um fator positivo para aplicações em que a temperatura é um requisito essencial.

#### 4.3.2 Avaliação Mecânica

A Figura 48 apresenta as curvas de tração uniaxial do compósito de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET nos diferentes sentidos de deposição do resíduo de não tecido, e a curva obtida para a resina epóxi. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para os compósitos de resina epóxi/laminados de não tecido de PE/PP/PET desenvolvidos.

Os laminados ou mantas de não tecidos de PE/PP/PET possuem como característica a formação de véu desorientado e com um leve sentido longitudinal das fibras originado pela passagem na carda e outras etapas de transporte do véu, somando com a consolidação do laminado/manta por passagem em cilindro perfurado com ar quente. Os enroskos físicos das fibras ao longo de seu comprimento no plano 2D presente no não tecido (as fibras possuem comprimento em torno de 38 mm), favorecem a

formação de enrosocos em sentidos multidirecionais, já que em suas extremidades podem conter fibras que ficam no sentido vertical e apontando para baixo ou para cima. Com a passagem de ar quente durante o processo de consolidação dos laminados, podem ocorrer ligações entre camadas diferentes do laminado que está sendo produzido no sentido vertical e, devido a esse processo, um certo grau de porosidade nos laminados/mantas pode ser formado. A presença desses poros no laminado é de grande importância para a preparação dos compósitos com matriz de resina epóxi, pois podem favorecer a molhabilidade dos laminados pela resina epóxi e, dessa forma, a obtenção de melhor interface entre o laminado e a resina epóxi.

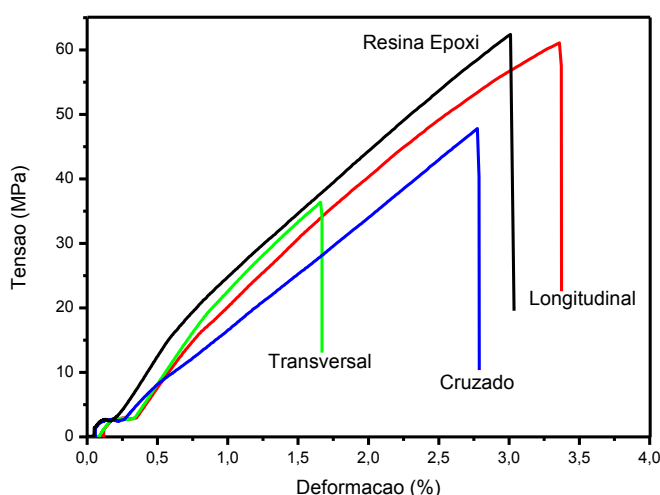


Figura 48: Curvas de tração nas composições: Laminado Cruzado, Laminado Transversal e Laminado Longitudinal e resina epóxi.

Tabela 12: Resultados dos ensaios de tração uniaxial da resina epóxi e dos compósitos de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET com diferentes sentidos de aplicação dos resíduos.

| Amostra               | Tensão<br>Máxima<br>(MPa) | Deformação na<br>Ruptura<br>(%) | Módulo<br>Elástico<br>(GPa) |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Resina Epóxi          | 55,9 ± 5,5                | 3,2 ± 0,4                       | 1,01 ± 0,25                 |
| Laminado Cruzado      | 54,5 ± 4,9                | 3,0 ± 0,4                       | 0,71 ± 0,05                 |
| Laminado Longitudinal | 61,3 ± 3,3                | 3,0 ± 0,3                       | 1,26 ± 0,02                 |
| Laminado Transversal  | 36,9 ± 2,0                | 1,6 ± 0,6                       | 1,35 ± 0,03                 |

Conforme comentado por Pardini [13], sendo a força axial aplicada no sentido longitudinal das fibras de um compósito, o resultado da resistência da tensão de ruptura tende a ter melhor desempenho quando comparado aos outros sentidos. Isso foi apresentado nos compósitos laminados onde: Laminado Longitudinal, Laminado Cruzado e Laminado Transversal, nessa ordem do mais resistente para o menos resistente, obtiveram desempenhos conforme a literatura em relação à tensão. O compósito de resina epóxi/laminado de não tecido de PE/PP/PET com os laminados dispostos na direção longitudinal (Laminado Longitudinal) apresentou aumento na tensão de máxima (neste caso a tensão de ruptura) na ordem de 11% superior a resina epóxi, além de aumento de 26% no módulo elástico, comparado a mesma matriz. Os ensaios realizados para amostras em que os laminados estavam dispostos na direção transversal de consolidação dos laminados apresentaram valores de tensão máxima inferiores à tensão observada para os laminados na direção longitudinal, porém um aumento bastante significativo foi observado no módulo elástico (cerca de 35%). Apesar desse resultado não ser o resultado esperado para compósitos estruturais clássicos (como compósitos formados por fibras longas de carbono, por exemplo), pode ser explicado, pois, mesmo havendo uma direção preferencial das fibras durante a consolidação do laminado, por se tratar de um não tecido, existem fibras em todas as direções (multidirecional), o que acarretou em aumento do módulo elástico quando submetido ao ensaio de tração uniaxial.

Ao preparar os compósitos com os laminados cruzados, a tendência é que o compósito formado não tenha nenhuma direção preferencial, e as fibras que compõem os laminados estão randomicamente dispersas no compósito, ocasionando uma diminuição do módulo elástico.

A Figura 49 apresenta as curvas de deflexão obtidas através do ensaio de flexão em três pontos dos compósitos de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET nos diferentes sentidos de deposição do resíduo de não tecido, além da resina epóxi. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para os compósitos desenvolvidos.

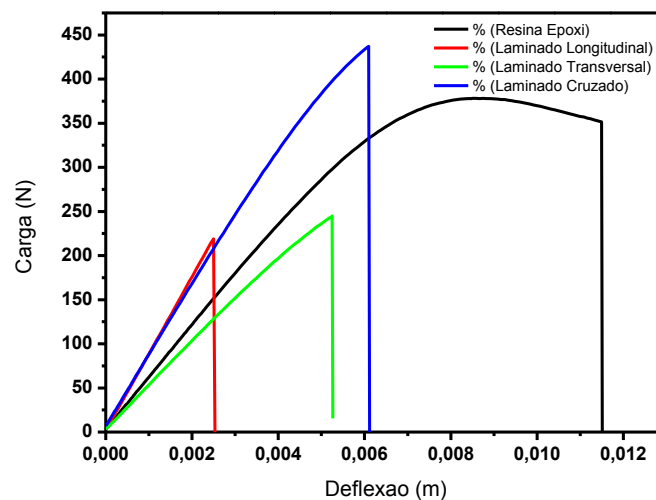


Figura 49: Curvas de deflexão nas composições: Laminado Longitudinal, Laminado Transversal, Laminado Cruzado e Resina Epóxi.

Tabela 13: Resultados dos ensaios de flexão de três pontos da resina epóxi e dos compósitos de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET com diferentes sentidos de aplicação dos resíduos.

| Amostra               | Módulo de Flexão | Resistência Máxima a Flexão |
|-----------------------|------------------|-----------------------------|
|                       | (GPa)            | (MPa)                       |
| ResinaEpóxi           | 63,8± 5,9        | 30,4 ± 2,4                  |
| Laminado Cruzado      | 94,7 ± 4,2       | 30,8 ± 4,2                  |
| Laminado Longitudinal | 92,0 ± 7,5       | 18,5 ± 7,7                  |
| Laminado Transversal  | 48,3 ± 3,3       | 21,2 ± 1,4                  |

Ao analisar os resultados de flexão em três pontos dos compósitos de resina epóxi/laminados de não tecidos de PE/PP/PET com diferentes sentidos de orientação desses laminados, nota-se que os laminados dispostos no sentido longitudinal (laminado longitudinal) apresenta módulo de flexão muito superior ao compósito com laminados dispostos no sentido transversal das fibras, estando de acordo com a literatura [13]. As fibras no sentido transversal apresentaram módulo de flexão inferior a resina epóxi. Por outro lado, ao utilizar as fibras no sentido cruzado, com fibras randomicamente dispersas no compósito, nota-se que o módulo de flexão se equipara ao do compósito com laminados na direção longitudinal, levando-se em consideração os desvios relativos.

A Figura 50 apresenta um gráfico comparativo do módulo de flexão e a Figura 51 apresenta o gráfico comparativo da tensão de flexão das composições estudadas.

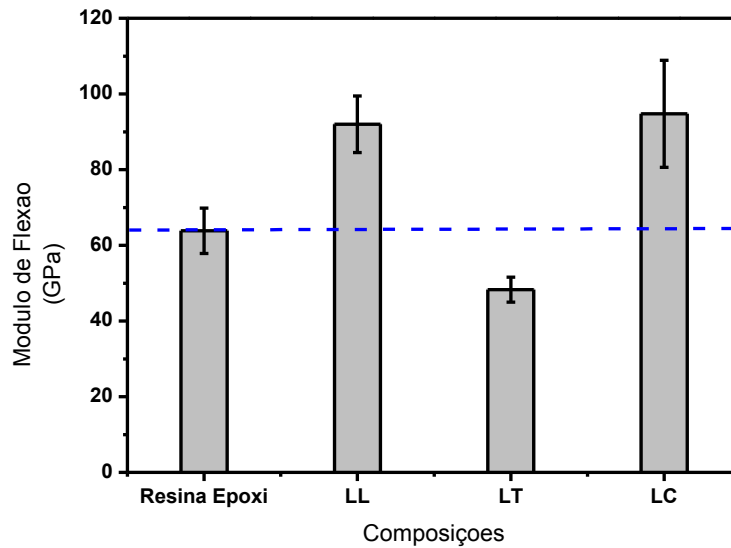


Figura 50: Módulo de Flexão nas composições: Laminado Longitudinal (LL), Laminado Transversal (LT), Laminado Cruzado (LC) e Resina Epóxi.

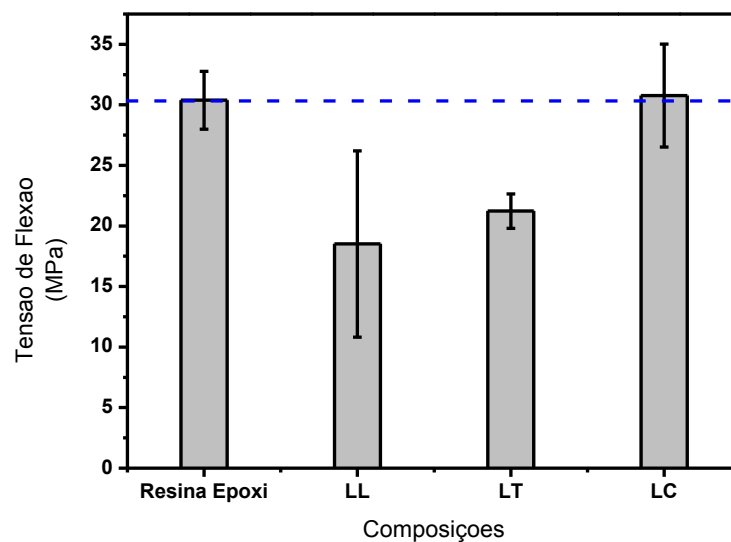


Figura 51: Tensão de Flexão nas composições: Laminado Longitudinal (LL), Laminado Transversal (LT), Laminado Cruzado (LC) e Resina Epóxi.

Dessa forma, obteve-se aumento no módulo de flexão na ordem de 48% para o compósito de resina epóxi/laminado de não tecido de PE/PP/PET dispostos no sentido

cruzado e aumento na ordem de 44% no módulo para os compósitos com resíduos dispostos no sentido longitudinal do processo de consolidação dos laminados.

Por fim, analisando-se as propriedades mecânicas, considerando a solicitação em tração uniaxial e em flexão em três pontos, os compósitos em que foram utilizados laminados dispostos no sentido longitudinal apresentaram os melhores resultados mecânicos, com incremento nos valores dos módulos elástico e de flexão, na ordem de 26% e 44%, respectivamente.

#### **4.3.3 Avaliação Morfológica**

A Figura 52 apresenta uma imagem obtida por microscopia ótica do laminado transversal em que é possível observar as camadas formadas nesse laminado, em que a distância entre as camadas está disposta de forma bastante regular, considerando o processo em que foi obtido (disposição manual dos laminados de não tecido entre as camadas de resina epóxi).



Figura 52: Imagem obtida por microscopia ótica do compósito de resina epóxi/laminado de não tecido de PE/PP/PET, mostrando a disposição das camadas.

A Figura 53 apresenta a microscopia ótica do compósito de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET com laminados dispostos no sentido cruzado.

Por esta imagem fica evidente a dispersão randômica das fibras do compósito desenvolvido, ou seja, as fibras não possuem um sentido preferencial no compósito, o que provocou diminuição das propriedades mecânicas obtidas por tração uniaxial desse compósito.



Figura 53: Imagem obtida por microscopia ótica do compósito de resina epóxi/laminado de não tecido de PE/PP/PET, com laminados dispostos no sentido cruzado. Aumento de 2,5 x.

A Figura 54 apresenta imagens obtidas por microscopia ótica do compósito de resina epóxi/laminado de não tecidos de PE/PP/PET com laminados dispostos no sentido longitudinal. Uma vez que os compósitos obtidos no sentido transversal foram obtidos de maneira análoga, e apenas os corpos de prova foram retirados no outro sentido, foram avaliados apenas corpos de prova no sentido longitudinal.

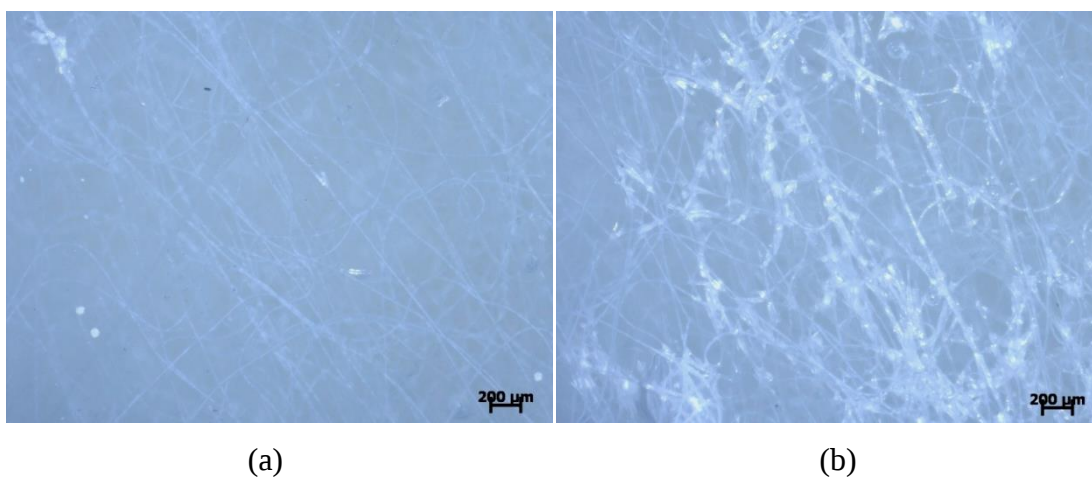


Figura 54: (a) e (b) Imagens obtidas por microscopia ótica do compósito de resina epóxi/laminado de não tecido de PE/PP/PET, com laminados dispostos no sentido longitudinal. Aumento de 2,5 x.

Como esse resíduo de não tecido é proveniente do processo de formação de véu desorientado em relação ao sentido das fibras, mas com cardagem e a consolidação da manta/laminado por passagem de ar quente em cilindro perfurado, é comum que as fibras tenham uma leve orientação longitudinal (sentido da máquina) devido a carda, esteiras e outras etapas do transporte da manta/laminado durante o processo. Dessa forma, foi

possível observar pelas imagens de microscopia ótica dos compósitos, essa orientação das fibras. Porém, nota-se a presença de fibras também na direção transversal. Esse fato é esperado por se tratar de um não tecido. Na Figura 54 (b) é possível notar que, mesmo esse compósito tendo apresentado boas propriedades mecânicas, há ainda falta de molhabilidade da resina epóxi nas fibras do não tecido. Uma forma de melhorar a molhabilidade pode ser a adição de um agente umectante.

#### **4.3.4 Correlação entre propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas**

Compósitos de resina epóxi reforçados com resíduo de não tecido de PE/PP/PET apresentaram resultados térmicos similares aos obtidos para a resina epóxi pura, sendo observado pequeno aumento na temperatura de transição vítrea e mantida a temperatura de início de degradação térmica irreversível do compósito desenvolvido em comparação com a matriz epoxídica. Esse resultado mostra-se bastante positivo uma vez que a adição desse resíduo não afetou as propriedades térmicas da resina epóxi.

No estudo relacionado ao sentido dos laminados de não tecido de PE/PP/PET como reforço em uma matriz de resina epóxi, comprovou-se que, mesmo as fibras que compõem o laminado não estarem todas na mesma direção, o sentido longitudinal de aplicação desses laminados apresentam resultados superiores de módulo elástico e módulo de flexão. Por outro lado, a disposição dos laminados no sentido cruzado, fazem com que as fibras estejam randomicamente dispersas no compósito, diminuindo o módulo elástico. A morfologia observada para esses materiais corrobora com os resultados mecânicos obtidos.



## 5 Conclusão

Neste trabalho foram desenvolvidos compósitos de matriz de resina epóxi reforçados com resíduos de fibras de não tecidos de PE/PP e com resíduos de laminados de não tecidos de PE/PP/PET.

O reaproveitamento desses resíduos que são descartados mostrou-se bastante promissor. Compósitos de resina epóxi/fibras de não tecido de PE/PP foram obtidos com diferentes teores desse resíduo (0,6, 1,2 e 2,4 pcr).

A adição de fibras de não tecidos de PE/PP aumenta a temperatura de transição vítrea da resina epóxi no compósito. Quanto maior o teor de fibras de não tecido na composição do compósito, maior a Tg da resina epóxi. Além disso, a adição de fibras de não tecido não altera a temperatura de início de degradação térmica irreversível dos compósitos.

A adição de 0,6 e 1,2 pcr de fibras de não tecidos aumentam o módulo elástico e módulo de flexão dos compósitos de matriz epoxídica. Compósitos com teor de 2,4 pcr apresentaram diminuição dessas propriedades decorrentes da baixa molhabilidade das fibras pela matriz de resina epóxi e que ocasionou uma fraca interface fibra/matriz, evidenciada na análise morfológica. Em decorrência do processo escolhido para obtenção dos compósitos, grande quantidade de bolhas e microvazios foram observados na análise da morfologia, e eram mais evidentes para maiores teores de fibras.

Compósitos de resina epóxi reforçados com laminados de não tecido de PE/PP/PET foram obtidos com diferentes direções preferenciais dos laminados (longitudinal e transversal da direção de puxamento da máquina, e sentido cruzado, em que foram intercalados os sentidos de puxamento). A adição das mantas/laminados aumentou a temperatura de transição vítrea da resina epóxi, sem alterar a temperatura de início de degradação térmica irreversível do compósito.

Esses laminados apresentam uma leve orientação na direção de consolidação, porém possuem uma grande quantidade de fibras multidirecionais, características essas pertencentes a classe dos não tecidos. E essa pequena orientação preferencial das fibras alterou significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos. Laminados com fibras dispostas no sentido longitudinal apresentam resultados superiores de módulo elástico e módulo de flexão em comparação com laminados dispostos no sentido

transversal e cruzados (fibras randomicamente dispersas no compósito). No entanto, a técnica de moldagem manual apresentou falhas na molhabilidade da resina sobre as fibras do não tecido.

Com relação aos ensaios realizados, pode-se afirmar, que mesmo o reforço sendo um residual da indústria de não tecido, a utilização desse resíduo como agente de reforço para a resina epóxi pode ser uma alternativa para diminuição da quantidade de descarte desse produto, utilizando-se de uma metodologia simples e de baixo custo.

## **6 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Aplicar processos de moldagem mais eficientes, como moldagem á vácuo, que reduzam as frações volumétricas de vazios para obter melhora no desempenho nos ensaios mecânicos.

Estudar a adição de umectantes, surfactantes e agentes compatibilizantes para melhorar a interface matriz/reforço, variando o tipo e a quantidade desses agentes e avaliar as propriedades térmicas, mecânicas e morfológicas dos compósitos formados.

Estudar a utilização de outras matrizes termofixas, como poliéster insaturado e poliuretano, que podem ser obtidos em temperaturas em que manterão íntegras as fibras de não tecidos.



## 7 Referências Bibliográficas

- [1] MORENT, Rino; GEYTER, Nathalie De; LEYS, Christophe; GENGEMBRE, Léon; PAYEN, Edmond. Surface Modification of Non-woven Textiles using a Dielectric Barrier Discharge Operating in Air, Helium and Argon at Medium Pressure. *TextileResearchJournal*, 2007.
- [2] SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, Ideias de Negócios – Fábrica de produtos em Tecido Não tecido, 2010.
- [3] SINDIVESTUÁRIO – Indústria da Moda e Negócios, Setor de não tecido e tecidos técnicos. Disponível em: <<http://sindivestuario.org.br/2011/09/setor-de-nao-tecidos-e-tecidos-tecnicos/>>. Acesso em: 16 de março de 2014.
- [4] ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. Classificação de resíduos, NBR10004. Rio de Janeiro, 2004.
- [5] FREIRE, Estevão; LOPES, Guilherme Bretz. Implicações da Política Nacional de Resíduos Sólidos para as práticas de gestão de resíduos no setor de confecções. REGIDE – Revista de Desing, Inovação e Gestão Estratégica, v.4, n01, 2013.
- [6] SINDIVESTUÁRIO – Indústria da Moda e Negócios, Setor de não tecido e tecidos técnicos. Disponível em: <<http://sindivestuario.org.br/2015/09/empresa-esta-transformando-roupas-velhas-em-tecidos-de-alta-qualidade/>> Acesso em 22/10/2015.
- [7] SHACKELFORD, James F. Ciência dos materiais. Pearson Education do Brasil - São Paulo, 2008.
- [8] CALLISTER, Willian D. C. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª ed. LTC, Rio de Janeiro, 2002.

- [9] HULL, D.; CLYNE, T. W. An Introduction to Composite Materials, Cambridge Solid State Science Series, Second Edition, Cambridge, 1996.
- [10] YOSOMYA, R.; MORIMOTO, K.; NAKAJIMA, A.; IKADA, Y.; SUZUKI, T. Adhesion and bonding in composites. New York, Marcell Dekker, 357p. 1989.
- [11] REZENDE, M. C; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. Polímeros: Ciência e tecnologia. v. 10, n. 2, 2000.
- [12] WANG, R. eG, S. ZHENG, Y. Polymer matrix composites and technology. Beijing: Woodhead Publishing, 2011. 570 p.
- [13] NETO, F. N. ; PARDINI, L. C. Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia BLUCHER, São Paulo, 2006.
- [14] CORREA, C.A.; FONSECA, C. N. P.; NEVES, S.; RAZZINO, C. A.; HAGE JR, E. Compósitos termoplásticos com madeira. Polímeros: ciência e tecnologia. v. 13, n. 3, p. 154-165, 2003.
- [15] MOLINA, J. C. Compósitos produzidos com resina epóxi, bambu e partículas de SiC. Revistamadeira: Arquitetura&Engenharia 2014.
- [16] PATNAIK, Amar e TEJYAN, Sachin. Mechanical and visco-elastic analysis of viscose fiber based needle-punched nonwoven fabric mat reinforced polymer composites: Part I, Journal of Industrial Textiles, 2012.
- [17] MARINUCCI, G. Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e tecnologia. São Paulo Artiber Editora, 2011.
- [18] CAVALCANTI, Wilma Sales. Compósitos Poliéster/Tecidos Tramados Vegetalvidro: Caracterização Mecânica E Simulação Da Sorção De Água, 141f. Tese de Doutorado. Universidade Federal De Campina Grande - Centro De Ciências E Tecnologia, 2006.

- [19] HAGE, Jr. E.; Compósitos e Blendas Poliméricas, Campinas, Instituto LatinoAmericano e IBM, 1989.
- [20] MANO, E.B. Polimeros como materiais de engenharia. São Paulo. Ed. Edgard Blucher, 1991.
- [21] COSTA, Michelli L.; REZENDE, Mirabel C.; PARDINI, Luiz C. Métodos de Estudo da Cinética de Cura de Resinas Epóxi, Polímeros: Ciência e Tecnologia - Abr/Jun - 1999.
- [22] CIRILO, Paula H. S. Estudo fractográfico de compósitos de fibra de carbono/matriz de polipropileno/polietileno submetidos a ensaios estáticos de tração e compressão. 115f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2015.
- [23] REZENDE, Mirabel C.; BOTELHO, Edson C. O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 10, nº 2, 2000.
- [24] PARDINI, Luiz C. Preformas para compósitos estruturais, Polímeros: Ciência e Tecnologia - vol. 10, nº 2, p. 100-109, 2000.
- [25] ERC - Epoxy Resin Committee – Disponível em: <<http://www.epoxy-europe.eu/>>. Acesso em: 25 de setembro de 2015.
- [26] SILAEX QUÍMICA LTDA – Disponível em: <<http://www.silaex.com.br>>. Acesso em: 25 de setembro de 2015.
- [27] ASHCROFT, W.; ELLIS, B. Chemistry and technology of epoxy resins. (B. Ellis, Ed.) Ellis, B., Ed, p. 327, 1993. Dordrecht: Springer Netherlands.
- [28] CONSIDINE, G. D. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

- [29] MANO, E.B.; Introdução a polímeros. 2ª edição revisada e ampliada, Edgard Blücher – São Paulo, 2004.
- [30] AUGUSTSSON, C. NM Epoxy Handbook. 3a. ed. Ytterby, Suécia: Nils Malmgren AB, 2004
- [31] COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. Métodos de Estudo da Cinética de Cura de Resinas Epóxi. Polímeros, v. abr/jun, p. 37 – 44, 1999.
- [32] ABINT – Associação Brasileira das Industrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos, Manual de Não tecidos. Classificação, Identificação e Aplicações de Não tecidos. 1999.
- [33] REWALD, Freddy Gustavo. Tecnologia dos Não tecidos. Matérias-primas, processos e aplicações finais. LCTE, São Paulo, 2006.
- [34] RUSSEL, S. J. Handbook of nonwovens. 1ª edição, CRC Press, New York, USA, 2007.
- [35] EDANA - European Disposables and Nonwovens Association. Disponível em: <<http://www.edana.org/discover-nonwovens/how-they're-made/formation>> Acesso em: 21 de dezembro de 2015.
- [36] LEE, M.E.M. OCKENDON, H. The transfer of fibres in the carding machine. Journal of Engineering Mathematics, 54: 261-271, 2006.
- [37] MACEDO, Angela M. K. S. Fibrastêxteis, 2ª Edição. Instituto Federal São Paulo.
- [38] DAS, D.; POURDEYHIMI, B. Composite Nonwoven Materials: Structure, Properties and Applications. Woodhead Publishing-Elsevier, UK, 2014.
- [39] YALCIN, Ipek; SADIKOGLU, TelemGok; BERKALP, Omer Berk; BAKKAL, Mustafa. Utilization of various non-woven waste forms as reinforcement in polymeric composites, Textile Research Journal, 2013.

[40] ABICALÇADOS – Associação Brasileira das Indústrias de Calçados, 1º Seminário de Resíduos Sólidos da Indústria Calçadista. Disponível em: <[http://www.abicalcados.com.br/site/noticias\\_detalhes.php?id=143](http://www.abicalcados.com.br/site/noticias_detalhes.php?id=143)>. Acesso em: 16 de março de 2014.

[41] DIÁRIO DO COMERCIO. No Brasil serão necessários R\$ 6,7 bilhões para coletar e dar destinação adequada à totalidade dos resíduos sólidos. Disponível em: <[http://diariodocomercio.com.br/noticia.php?tit=no\\_brasil\\_serao\\_necessarios\\_r\\_6,7\\_bilhoes&id=127969](http://diariodocomercio.com.br/noticia.php?tit=no_brasil_serao_necessarios_r_6,7_bilhoes&id=127969)>. Acesso em: 16 de março de 2014.

[42] MUNDO CERTO. Você sabe o que é a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS? <<http://www.mundocerto.com.br/artigo-interna.aspx?id=15>>. Acessado em: 16 de março de 2014.

[43] IBAM - Instituto Brasileiro De Administração Municipal. Manual gerenciamento integrado de resíduos sólidos. IBAM, 2001.

[44] MENDES, Rodrigo. Artigo apresentado à Universidade Católica de Goiás para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Católica de Goiás. Disponível em <<http://www.ucg.br/ucg/prograd/graduacao/home/index.asp>> Acesso em 24/02/2014.

[45] Meio Ambiente – Indústria e Sustentabilidade. Setor de não tecidos e tecidos técnicos é o maior reciclador de PET do país. 2011. Disponível em: <<http://rmai.com.br/v4/Read/1532/nova-saveiro-usa-tecidos-dos-bancos-e-portas-com-fios-de-pet-reciclado.aspx>> Acesso em 16/03/2014.

[46] Meio Ambiente – Indústria e Sustentabilidade. Nova Saveiro usa tecidos dos bancos e portas com fios de PET reciclado. 2013. Disponível em: <<http://rmai.com.br/v4/Read/1021/setor-de-nao-tecidos-e-tecidos-tecnicos-e-o-maior-reciclador-de-pet-do-pais-.aspx>> Acesso em 16/03/2014.

[47] SHINDO, Yasuhide; TAKEDA, Tomo; NARITA, Fumio. Mechanical response of nonwoven polyester fabric/epoxy composites at cryogenic temperatures, Department of Materials Processing, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Aoba-yama 6-6-02, Sendai 980-8579, Japan, 2012

[48] PATNAIK, Amar e TEJYAN, Sachin. A Taguchi approach for investigation of solid particle erosion response of needle-punched nonwoven reinforced polymer composites: Part II, Journal of Industrial Textiles, 2012

[49] Veidt, M. – “Stiffness Properties of Three Dimensionally(3D) Reinforced Glass Fabrics Produced by Needle-Felting”, Proceedings of ICCM-11, Vol V – Textile Composites and Characterization, p. 742, GoldCoast, Australia (1997).

[50] OLIVEIRA, Jorge Fernando de Sousa. Plásticos Reforçados a Base de Tecidos Híbridos: Efeitos da Anisotropia e Geometria Normativa na Caracterização Mecânica e Fratura. 180f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de Tecnologia, 2013.

[51] SONG, Min-Kyu; KIM, Young-Taek; CHO, Jin-Yeon; CHO, Byung Won; POPOV, Branko N.; RHEE, Hee-Woo; Composite polymer electrolytes reinforced by non-woven fabrics. Journal of Power Sources. Páginas 10 à 16. Volume 125, Issue 1 -2004.

[52] KRZYSIK, A.M.; YOUNGQUIST, J.A. Bonding of air-formed woodfibre/polypropylene fibre composites. International Journal of Adhesion and Adhesives. Páginas 235 à 240, Volume 11, Issue 4, 1991.

[53] CHEN, Zhen; FANG, Guodong; XIE, Junbo; LIANG, Jun. Experimental study of high-temperature tensile mechanical properties of 3D needled C/C–SiC composites. Materials Science and Engineering: A. Páginas 271 à 277. Volume 654, 2016.

[54] NI, Nannan; WEN, Yuefang; HE, Delong; YI, Xiaosu; ZHANG, Tao; XU, Yahong. Ex-situ toughness and damping research of the co-cured bismaleimide matrix composite with aramid nonwoven fabrics. Composites Part B: Engineering Available, 2016.

- [55] ANDRE, N. G.; ISHAK, Z. A. Mohd. Predicting the Tensile Modulus of Randomly Oriented Nonwoven Kenaf/Epoxy Composites. *Procedia Chemistry*. Páginas 419 à 425. Volume 19, 2016.
- [56] HUNTSMAN. Advanced Materials. Aerospace Materials for Production and Assembly. Disponível em: <[www.huntsman.com/advanced\\_materials](http://www.huntsman.com/advanced_materials)> Acesso em 27/09/2015.
- [57] ASTM - American Society for Testing and Materials. D 638-08 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Pennsylvania - USA, 2008.
- [58] ASTM - American Society for Testing and Materials. D 790-07, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Pennsylvania - USA, 2007.
- [59] CANEVAROLO Jr., Sebasuão V. Ciência dos polímeros: um teste básico para tecnólogos e engenheiros. Artliber Editora - São Paulo, 2002.
- [60] DREMEL – Big on detail. Disponível em: <<http://www.dremeleurope.com/pt/pt/>> Acesso em 26/10/2015.
- [61] D. C, Sousa Lima. Propriedades Mecânicas IV. Programa de Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia (IME).
- [62] FARAVELLI, T.; BOZZANO, G.; COLOMBO, M.; RANZI, E. & DENTE, M. - J. Anal. Appl. Pyrolysis, 70, p.761, 2003.
- [63] BODER, G. Structural Investigations of Polymers, Ellis Horwood, New York - 1991.
- [64] Brandrup, J.; Immergut, E. H.; Polymer Handbook, 3rd ed., John Wiley: New York, 1980.

[65] LEE, L-H. Mechanisms of Thermal Degradation of Phenolic Condensation Polymers. II Thermal Stability and Degradation Schemes of Epoxy Resins. Journal of Polymer Science: Part A Vol. 3, Pp. 859-882 - 1965.

[66] DOW - Dow Answer Center - Dow Epoxy - Thermal Decomposition. Disponível em: <[http://dowac.custhelp.com/app/answers/detail/a\\_id/11085/~/dow-epoxy---thermal-decomposition](http://dowac.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/11085/~/dow-epoxy---thermal-decomposition)> Acesso em 26/10/2015.