

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PEDRO HENRIQUE DE OMENA JUCÁ

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM DIFERENTES
TEMPERATURAS DO PET E ENSAIOS DE ARRANCAMENTO COM
TRATAMENTO MECÂNICO EM MATRIZ CIMENTÍCIA A BASE DE CIMENTO
PORTLAND**

Alegrete

2017

PEDRO HENRIQUE DE OMENA JUCÁ

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM DIFERENTES
TEMPERATURAS DO PET E ENSAIOS DE ARRANCAMENTO COM
TRATAMENTO MECÂNICO EM MATRIZ CIMENTÍCIA A BASE DE CIMENTO
PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: PhD. Wang Chong

Coorientador: Me. Jaelson Budny

Alegrete

2017

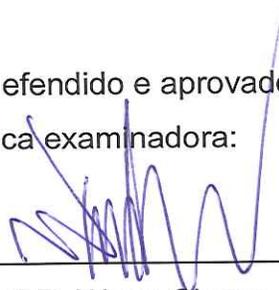
PEDRO HENRIQUE DE OMENA JUCÁ

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM DIFERENTES
TEMPERATURAS DO PET E ENSAIOS DE ARRANCAMENTO COM
TRATAMENTO MECÂNICO EM MATRIZ CIMENTÍCIA A BASE DE CIMENTO
PORTLAND**

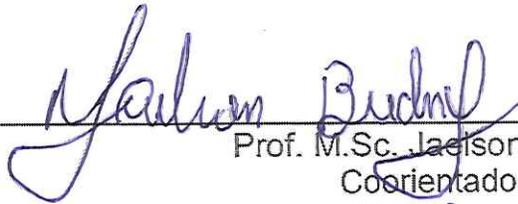
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de Junho de 2017.

Banca examinadora:



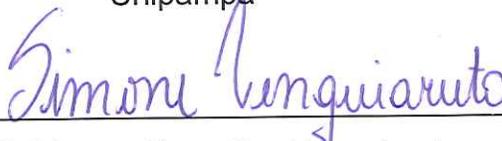
Prof. PhD. Wang Chong
Orientador
Unipampa



Prof. M.Sc. Jaelson Budny
Coorientador
Unipampa



Prof. D. Ederli Maragon
Unipampa



Prof. M. Simone Dornelles Venquiaruto
Unipampa

Dedico este trabalho a Mario e Fariza,
Letícia Maria, João Vitor, Letícia e aos
meus avós.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus que me fornece toda a força e fé durante todos os períodos da minha vida.

Ao Prof.^o Jaelson Budny e Prof.^o Wang Chong que contribuíram de forma preponderante na elaboração deste trabalho, orientando e se disponibilizando na condução de cada seção desta trajetória de período acadêmico.

A Universidade Federal do Pampa – Unipampa, por proporcionar a consecução desta etapa de formação de engenheiro civil, fornecendo materiais, o laboratório e os técnicos Dieison Gabbi, Raquel Machado, Gean Oldra, Janice Facco que colaboraram na execução dos ensaios e ao engenheiro civil Marcelo Oliveira.

Agradeço aos professores que colaboraram no ensino que me foi atribuído, e novamente ao professor Wang Chong que possibilitou meu ingresso em pesquisas e despertou minha fomenta por inovação e desenvolvimento de novas tecnologia na engenharia.

A base de sustentação de amizade e companheirismo de meus colegas e amigos, em especial ao Eduardo Pachla, minha dupla de pesquisa desde o início da graduação, a Letícia Larré pela preocupação, auxílio, paciência e ajuda incansável, ao Raphael Paim por todas as ajudas, a Jéssica pela orientação sempre educada, a Débora Bretas pela incansável paciência nas dúvidas, ao Angelo pela amizade, ao Glauber e Thiago Rorig pela convivência e descontração, ao Diego e Thiago Victor pela parceria e aos demais que estiveram presente durante esse processo acadêmico.

“...Ser capaz de mergulhar, rever o caminho.
Coragem de dizer não, quando cabe sim.
Coragem de enfrentar visões diferentes
Visões e olhares de si
Massacre memorável do ser
Caminhos tortuosos, corrigir e viver!”.

Mario Jucá

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar as propriedades mecânicas do politereftalato de etileno visando o processo de produção de fibras com tratamentos mecânico superficial e térmico para o emprego em diversos ramos da engenharia civil. A metodologia aplicada a este estudo consistiu em ensaios mecânicos e de microscopia, seguindo as seguintes etapas: caracterização dos materiais utilizados; produção da fibra de PET; tratamentos mecânico superficial e térmico; ensaio de tração; ensaio de arrancamento; e análise superficial por microscopia eletrônica de varredura. No tratamento térmico foram analisadas temperaturas, na qual as amostras de PET eram expostas por um período de 60 minutos, para posterior ensaio de tração direta. Os melhores resultados para o ensaio de tração em relação à resistência foi a temperatura de 40°C e em relação a deformação foi a temperatura de 180°C. Em relação ao tratamento mecânico superficial as amostras demonstram superioridade na força de arrancamento com aumento de 115,77% e 102,17%, para idade de 3 dias e 7 dias respectivamente, em comparação a amostras sem tratamento. Já na microscopia foi verificado a possível relação entre a laminação das amostras com a perda de resistência à tração, garantindo assim temperaturas ideais para o emprego das fibras, aumentando a gama de utilizações de elementos reciclados na construção civil.

Palavras-Chave: fibras de PET, propriedades mecânicas, politereftalato de etileno reciclado.

ABSTRACT

The aim of this search is to analyze the mechanical properties of polyethylene terephthalate, aiming at the production process of fibers with superficial and thermal mechanical treatments for use in various branches of civil engineering. The methodology applied to this study consisted of mechanical and microscopy tests, following the following steps: characterization of the materials used; Production of PET fiber; Surface and thermal mechanical treatments; Traction test; Pullout test; And surface scanning by scanning electron microscopy. In the heat treatment, temperatures were analyzed, in which the PET samples were exposed for a period of 60 minutes, for a further direct traction test. The best results for the tensile strength test were the temperature of 40 ° C and the deformation was the temperature of 180 ° C. In relation to the superficial mechanical treatment, the samples showed superior pullout strength with an increase of 115.77% and 102.17% for the age of 3 days and 7 days, respectively, compared to samples without treatment. In the microscopy the possible relationship between the lamination of the samples and the loss of tensile strength was verified, thus guaranteeing the ideal temperatures for the use of the fibers, increasing the range of uses of recycled elements in the civil construction.

Keywords: PET fibers, mechanical properties, recycled polyterephthalate ethylene.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura de ligação dos meros simples formando um polímero..... | 20 |
| Figura 2 - Formação de Grupos Funcionais Reativos (-OH) | 21 |
| Figura 3 - Formação de dupla ligação simples através de ligações π instabilizada. . | 21 |
| Figura 4 - Curvas de tensão x deformação típicas para um plástico rígido, uma fibra, um plástico flexível e um elastômero..... | 22 |
| Figura 5 - Esquema de obtenção de alguns polímeros a partir do carvão mineral.... | 23 |
| Figura 6 - Divisão da matéria prima obtida do petróleo | 24 |
| Figura 7 - Crescimento crescente de cadeia, partindo de uma molécula de gás até um plástico sólido | 25 |
| Figura 8 - Pontos de fusão e ebulição de diversas moléculas de hidrocarboneto | 26 |
| Figura 9 - Forças intermoleculares nas cadeias moleculares..... | 27 |
| Figura 10 - Arquitetura molecular e definição da estrutura | 28 |
| Figura 11 - Estrutura do termoplástico amorfo e semicristalino..... | 30 |
| Figura 12 - Anéis obtidos por difração de raio x em polímero com presença de cristais dispersos e imperfeitos (a) e em metais cristalinos (b)..... | 31 |
| Figura 13 - Fator de conversão de volume específico para densidade normatizada. | 33 |
| Figura 14 - Módulo de Elasticidade de diversos materiais a 20-25°C | 38 |
| Figura 15 - Coeficiente de expansão térmica dos polímeros é sensível ao grau de cristalinidade..... | 40 |
| Figura 16 - Transparência de polímeros cristalinos depende do tamanho dos cristalitos..... | 41 |
| Figura 17 - Reação de obtenção do PET a partir do ácido tereftálico. | 43 |
| Figura 18 - Conformação da molécula de PET na fase cristalina e na sua célula unitária..... | 44 |
| Figura 19 - Ciclo de reciclagem | 45 |
| Figura 20 - Identificação dos códigos recomendado pelo instituto de garrafas | 46 |
| Figura 21 - Classificação do arranjo das fibras..... | 49 |
| Figura 22 - Zona de interface de um compósito reforçado com fibra de aço..... | 50 |
| Figura 23 - Curva granulométrica da areia | 52 |
| Figura 24 - Processo de higienização da garrafa | 54 |
| Figura 25 - Linha de corte para a retirada do fundo | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 26 - Ângulo da lâmina com a base de corte | 56 |
| Figura 27 - Formação do filete a partir da garrafa | 56 |
| Figura 28 - Redução da espessura do filete | 57 |
| Figura 29 - Engrenagens utilizadas para tratamento mecânico..... | 58 |
| Figura 30 - Fibras de politereftalato de etileno com tratamento mecânico | 59 |
| Figura 31 - Fluxograma de produção da fibra de PET..... | 59 |
| Figura 32 - Estufa utilizada para a realização do tratamento térmico..... | 60 |
| Figura 33 - Disposição das amostras para colocação na estufa | 61 |
| Figura 34 - Ensaio de resistência à tração da fibra | 62 |
| Figura 35 - Amostra no formato de halter para ensaio de tração em termoplásticos | 63 |
| Figura 36 - Moldes em MDF cortados a laser..... | 63 |
| Figura 37 - Pontos de rompimento das amostras..... | 64 |
| Figura 38 - Microscópio eletrônico de varredura. | 66 |
| Figura 39. Equipamento de metalização | 67 |
| Figura 40. Amostra dentro do equipamento de metalização | 67 |
| Figura 41 - Amostra metalizada oito vezes..... | 68 |
| Figura 42 - Amostra no interior do MEV para realização de imagens. | 68 |
| Figura 43 - Curvas tensão x deformação das amostras de PET transparente | 70 |
| Figura 44 - Curvas tensão x deformação das amostras de PET verde | 71 |
| Figura 45 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 40 °C | 73 |
| Figura 46 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 60 °C | 73 |
| Figura 47 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 80 °C | 74 |
| Figura 48 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 100 °C | 74 |
| Figura 49 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 120 °C | 75 |
| Figura 50 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 140 °C | 75 |
| Figura 51 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 160 °C | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura 52 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 180 °C | 76 |
| Figura 53 - Variação de tensão x temperatura das amostras | 79 |
| Figura 54 -Variação da deformação até o rompimento x temperatura das amostras | 80 |
| Figura 55 - Ruptura da amostra sem reparação..... | 80 |
| Figura 56 - Ensaio de arrancamento da fibra | 81 |
| Figura 57 - Arrancamento da fibra lisa aos 3 dias | 83 |
| Figura 58 - Amostra - Temperatura 40°C - Ampliação de 500x..... | 84 |
| Figura 59 - Amostra - Temperatura 40°C - Ampliação de 1000x..... | 84 |
| Figura 60 - Amostra - Temperatura 60°C - Ampliação de 500x..... | 85 |
| Figura 61 - Amostra - Temperatura 60°C - Ampliação de 1000x..... | 85 |
| Figura 62 - Amostra - Temperatura 80°C - Ampliação de 500x..... | 86 |
| Figura 63 - Amostra - Temperatura 80°C - Ampliação de 1000x..... | 87 |
| Figura 64 - Amostra - Temperatura 100°C - Ampliação de 500x..... | 87 |
| Figura 65 - Amostra - Temperatura 100°C - Ampliação de 1000x..... | 88 |
| Figura 66 - Amostra - Temperatura 120°C - Ampliação de 500x..... | 88 |
| Figura 67 - Amostra - Temperatura 120°C - Ampliação de 1000x..... | 89 |
| Figura 68 - Amostra - Temperatura 140°C - Ampliação de 500x..... | 89 |
| Figura 69 - Amostra - Temperatura 140°C - Ampliação de 1000x..... | 90 |
| Figura 70 - Amostra - Temperatura 160°C - Ampliação de 500x..... | 91 |
| Figura 71 - Amostra - Temperatura 160°C - Ampliação de 1000x..... | 91 |
| Figura 72 - Amostra - Temperatura 180°C - Ampliação de 500x..... | 92 |
| Figura 73 - Amostra - Temperatura 180°C - Ampliação de 1000x..... | 92 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Volume específico e densidade da fase amorfa e cristalina de alguns polímeros..... | 34 |
| Tabela 2 - Entalpia de Fusão de alguns polímeros | 34 |
| Tabela 3 - Grau de cristalinidade de PET processado | 36 |
| Tabela 4 - Ensaio de granulometria da areia..... | 52 |
| Tabela 5 - Massa específica e módulo de finura da areia | 53 |
| Tabela 6 - Traço da argamassa..... | 53 |
| Tabela 7 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação das fibras transparentes | 71 |
| Tabela 8 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação das fibras verdes | 72 |
| Tabela 9 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 40°C | 77 |
| Tabela 10 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 60°C | 77 |
| Tabela 11 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 80°C | 77 |
| Tabela 12 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 100°C | 77 |
| Tabela 13 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 120°C | 78 |
| Tabela 14 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 140°C | 78 |
| Tabela 15 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 160°C | 78 |
| Tabela 16 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 180°C | 78 |
| Tabela 17 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à cisalhamento da fibra com tratamento mecânico superficial com idade de 3 dias | 81 |

| | |
|---|----|
| Tabela 18 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à cisalhamento da fibra sem tratamento com idade de 3 dias | 82 |
| Tabela 19 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à cisalhamento da fibra com tratamento mecânico superficial com idade de 7 dias | 82 |
| Tabela 20 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à cisalhamento da fibra com tratamento mecânico superficial com idade de 7 dias | 82 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | Objetivos | 18 |
| 1.1.1 | Objetivos Gerais | 18 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 18 |
| 1.2 | Justificativa..... | 19 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 20 |
| 2.1 | Fundamentos dos Polímeros | 20 |
| 2.2 | Termorrígidos | 28 |
| 2.3 | Termoplásticos | 29 |
| 2.3.1 | Termoplásticos Amorfos | 29 |
| 2.3.2 | Termoplásticos semicristalinos..... | 31 |
| 2.3.3 | Cristalinidade e propriedades..... | 37 |
| 2.3.3.1 | Módulo elástico..... | 37 |
| 2.3.3.2 | Tempo de relaxação | 39 |
| 2.3.3.3 | Temperatura de transição vítrea..... | 39 |
| 2.3.3.4 | Volume específico e coeficiente de expansão térmica | 40 |
| 2.3.3.5 | Solubilidade..... | 40 |
| 2.3.3.6 | Permeabilidade a gases e vapores..... | 40 |
| 2.3.3.7 | Propriedades óticas..... | 41 |
| 2.4 | Politereftalato de Etileno | 42 |
| 2.5 | Matriz e Interface de Ligação | 47 |
| 2.5.1 | Matriz Cimentícia..... | 47 |
| 2.5.2 | Forma e Distribuição de Fibras..... | 48 |
| 2.5.3 | Interface Matriz-Fibra | 49 |
| 2.5.4 | Arrancamento..... | 50 |
| 3 | METODOLOGIA | 51 |
| 3.1 | Caracterização dos Materiais | 51 |
| 3.1.1 | Agregado Mineral..... | 51 |
| 3.1.2 | Cimento | 53 |
| 3.1.3 | Fibra | 53 |
| 3.2 | Tratamento térmico | 60 |
| 3.3 | Ensaio de tração direta | 62 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3.1 | Ensaio de arrancamento (PULLOUT) | 64 |
| 3.3.2 | Microscopia eletrônica de varredura | 65 |
| 4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 70 |
| 4.1 | Tração direta das fibras em temperatura ambiente | 70 |
| 4.2 | Tração direta das fibras em diferentes temperaturas | 72 |
| 4.3 | Ensaio de arrancamento..... | 81 |
| 4.4 | Microscopia eletrônica de varredura..... | 83 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 94 |
| 5.1 | Conclusões..... | 94 |
| 5.2 | Sugestões para trabalhos futuros | 96 |

1 INTRODUÇÃO

O processo de industrialização ocorre fundamentado na evolução econômica histórica de uma nação, com o início de investimento em pesquisas e inovações tecnológicas garantindo ao processo produtivo níveis operacionais mais elevados e facilidade na obtenção do produto final com o menor custo de produção associado a um menor tempo de processo.

Associada a produção de produtos e serviços, o resíduo final do consumidor em escala global, passa a gerar níveis alarmantes, tanto pela quantidade em toneladas por ano, quanto pelo longo período de degradação dos materiais. Toda a questão de sustentabilidade, no século XXI, inicia-se antes do processo de produção para que o produto possa ser reciclado, ou apresentar componentes com o processo de degradação acelerada por meios biológicos, ou químicos inerentes ao mesmo, e caso o produto seja contaminante ao sistema de coleta como tintas e agentes químicos a empresa produtora tem sistemas de descarte em locais legalizados pela secretaria de meio ambiente de cada região.

A sustentabilidade no meio produtivo é lançada como um desafio, pois a idealização de que todo o lixo produzido, resultado do consumo, será reciclado ou destinado em locais licenciados não acontece, tanto pela falta de fiscalização quanto pela falta de conhecimento da população consumidora, e através desse fator as indústrias especializadas em reciclagem passam a dominar o trabalho de coleta e tratamento visando venda futura para empresas de reutilização. Dentro da gama de materiais poluentes o plástico se destaca pelo seu problema de volume, que em relação ao seu peso a um grande volume, de maneira que quando compactados ocupam muito espaço quando refugados (MICHAELI, 1995).

Outro fator que o lixo plástico apresenta é a má biodegradabilidade, que por meios biológicos acabam, segundo Eco-UNIFESP, demorando centenas de anos para uma garrafa plástica desaparecer. Caso o processo de degradação seja feita por meios mecânicos e industriais, como pela queima, podem gerar agentes químicos agressivos para o meio ambiente como o cloro proveniente do PVC, o nitrogênio da espuma de poliuretano ou da poliamida, e metais pesados em muitos outros plásticos (MICHAELI, 1995).

Na diversidade de plásticos existentes no mercado como embalagens de produtos domésticos, peças no setor industrial e eletrônico, um poliéster se destaca, o poly(ethylene terephthalate) segundo a IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry, mais conhecido pela abreviação PET, traduzido para o português politereftalato de etileno, o mais famoso poliéster, descoberto nos laboratórios da empresa Du Pont pelos químicos John Rex Whinfield e James Tennant Dickson em 1941, para a utilização em indústrias têxteis. Com propriedades mecânicas excelentes este poliéster se destaca no ramo de embalagens pela facilidade de produção, moldagem e garantia de estanqueidade de gases e líquidos.

A comprovação de resistência mecânica dá ao PET a sua utilização na indústria de pneus em 1962. As primeiras embalagens surgem nos Estados Unidos no início dos anos 70 e logo após disseminam-se na Europa, o que só iria ocorrer no Brasil no ano de 1988, sendo utilizado na indústria têxtil e cinco anos depois, em 1993, passa a ter uma grande representatividade nas indústrias de embalagens, com foco em bebidas gaseificadas (ABIPET, 2017).

O PET é um polímero termoplástico, pois é formado pela repetição dos monômeros de tereftalato de etileno e sua estrutura molecular não apresenta ligações cruzadas, ou seja, pode ser fundido e solidificado repetidas vezes, sem variação em suas propriedades (MANRICH, 2013).

Certificando ao seu processo de produção uma reutilização pós-consumo, por meio do processo de reciclagem com preço baixo, de cerca oitenta centavos o quilograma, tem uma imensa rede de reutilização como mantas, edredons, cabides, garrafas, vassouras, cordas, régua, relógios, lápis, canetas, caixas d'água, tubos e conexões, telhas, mármore sintéticos, tintas, para-choques, partes da cabine do carro, sinalização horizontal de vias, cadeiras de transporte coletivo, celulares, entre outros (ABIPET, 2017).

A aplicação na construção civil é recente e tem sido alvo de fontes de pesquisas de diversos empregos, como de agregado, agente amplificador de tenacidade da matriz utilizada, e fibras para a melhora nas propriedades mecânicas.

O emprego de fibras de diversos materiais principalmente os poliméricos e metálicos em obras, com o intuito de melhorar as características da estrutura é atual. Suas melhorias na tenacidade e na ductilidade do concreto convencional resultaram

na migração do concreto Portland para outros ramos da construção, como o de misturas asfálticas.

A utilização de fibras para reforços ou reparos tem apresentado bons resultados, o que leva os demais ramos da engenharia civil a estudar casos em que as fibras possam proporcionar ganhos significativos (HECK, 2015).

A fibra de politereftalato de etileno utilizada neste trabalho origina-se de garrafas PET, que através do processo de reciclagem e corte fornecem um material de grande resistência à tração e garante adesividade com a matriz, devido ao seu tratamento mecânico.

Associado a melhoria da sua implementação há a diminuição de garrafas presentes no meio ambiente, amplificando o mercado de reciclagem do PET no Brasil que segundo a ABIPET, Associação Brasileira de Indústrias da PET, é um dos maiores do mundo com cerca de 331 mil toneladas de embalagens recicladas por ano.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Analisar as propriedades mecânicas do politereftalato de etileno visando o processo de produção de fibras com tratamentos mecânico superficial e térmico para o emprego em diversos ramos da engenharia civil.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento mecânico do PET reciclado transparente e verde;
- Avaliar a resistência à tração do PET com tratamento térmico a diferentes temperaturas;
- Avaliar o arrancamento da fibra de PET com e sem tratamento mecânico superficial em matriz cimentícia;
- Analisar a borda de corte da fibra por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

1.2 Justificativa

As fibras quando adicionadas a uma matriz tem diferentes princípios de ação, quando adicionadas ao concreto a base de cimento Portland, de acordo com o grau de adesividade matriz-fibra, existe o aumento da resistência à tração, aumentando drasticamente a tenacidade do material, e diminuindo o tamanho de fissuração decorrente de diferentes retrações, resultando em um aumento na durabilidade e segurança no elemento empregado.

Já no concreto asfáltico tem a finalidade de evitar a fluência do pavimento, proporcionado pela fixação de ligante junto a fibra devido à grande superfície específica, e graças a sua geometria (alongada) agem como reforço na mistura que liga o agregado, tendo como consequência um aumento na resistência mecânica da mistura asfáltica (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008).

A aplicação de fibras de PET apesar de ser um elemento de estudo constante nos últimos anos, apresenta dificuldade devida a grande falta de aderência, resultado da superfície extremamente lisa do PET, juntamente com sua grande variabilidade de espessura das garrafas, portanto os tratamentos empregados neste trabalho tem a função de suprir essas deficiências, através do tratamento mecânico alterando a superfície de contato entre a fibra e a matriz, e por meio do tratamento térmico para determinar um maior padrão de comportamento, dando confiabilidade e segurança em sua aplicação.

O tratamento térmico tem uma outra função que determina o comportamento da fibra em misturas em que a temperatura é maior que a do ambiente, como a de misturas asfálticas, para que seja verificado se o grau de cristalização do polímero trará alguma perda na deformação total da fibra.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

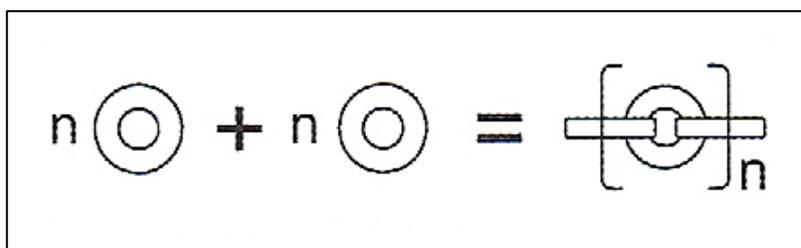
2.1 Fundamentos dos Polímeros

O termo plástico define-se como uma macromolécula composta de dezenas de milhares de elementos individuais, denominados monômeros, que se associam e formam uma cadeia ligada por covalência repetidamente, formando uma espécie de fio, o qual é nomeado polímero, e o emaranhado desses fios resultam no plástico (MICHAELI, 1995).

Este conceito genérico aos plásticos pode ser referido ainda de forma mais específica, pela infinidade de monômeros base, estruturas das cadeias, número constituinte dos meros no polímero e reações associadas a síntese, todas essas propriedades variáveis resultam em uma grande gama de produtos finais com características e estados físicos distintos.

Nos anos 30, foi desenvolvido pelo químico prof. Hermann Staudinger o modelo estrutural do polímero, que em 1953 ganhou o prêmio Nobel pelas suas pesquisas nesta caracterização (MICHAELI, 1995). Para elucidação deste sistema de formação, dado pela repetição de elementos ligados sequencialmente como anéis, a ilustração dos polímeros sintéticos estruturados por unidades repetidas simples está discriminado na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura de ligação dos meros simples formando um polímero



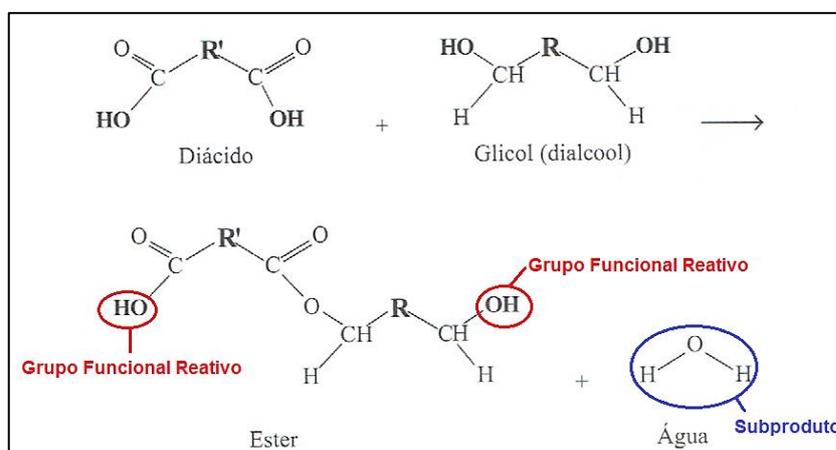
Fonte: Manrich (2013, p.25)

A formação de uma cadeia polimérica, tem necessidade que o polímero que o constitui tenha no mínimo dois pontos reativos, devendo assim ser capaz de ligar-se a dois outros monômeros, esse ponto de reatividade pode ser obtido com a presença de grupos funcionais reativos e/ou duplas ligações reativas e é denominado de

funcionalidade, portanto o monômero deve ter no mínimo funcionalidade 2 (CANEVAROLO, 2002).

Segundo Canevarolo (2002), moléculas em condições propícias de temperatura e pressão podem reagir formando macromoléculas, quando estas moléculas são grupos funcionais reativos. A molécula de ácido reage com a molécula de álcool, formando um produto e um subproduto na reação, a molécula de água conforme Figura 2, deixando assim no produto dois outros grupos reativos para formação da cadeia polimérica.

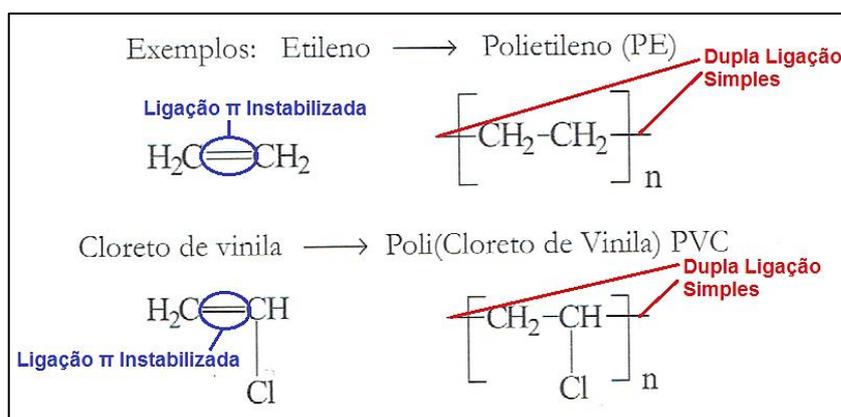
Figura 2 - Formação de Grupos Funcionais Reativos (-OH)



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2002, p.22).

Outro caso para o ponto reativo é de duas ligações reativas, como supracitado, resultado de uma ligação π instabilizada, levando as ligações duplas simples (Figura 3).

Figura 3 - Formação de dupla ligação simples através de ligações π instabilizada.



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2002, p.22).

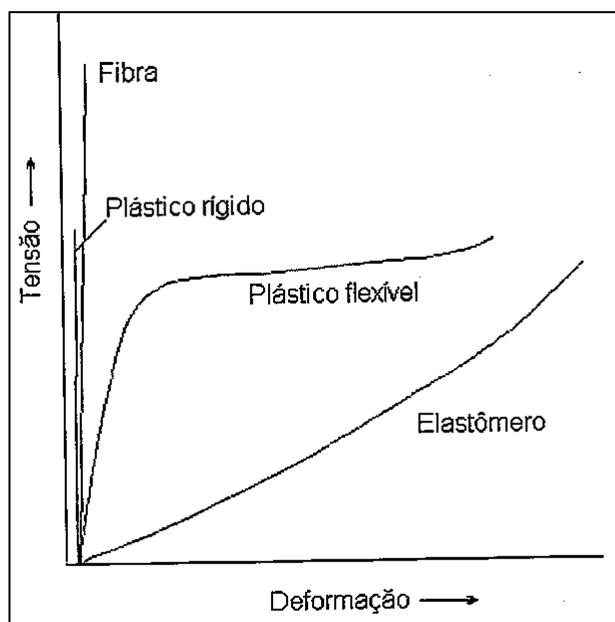
O fator que determina a reação de ligação dos elos (anel+anel) é chamado de polimerização, que pode ser formada de um só tipo de monômero, ou com dois ou mais tipos de monômeros, intitulado homopolímero e copolímero respectivamente (CANEVAROLO, 2002).

Dependendo do tipo de monômero constituinte, do número de repetições dos meros em cadeia e do respectivo tipo de ligação covalente pode-se dividir em três grandes classes de materiais: plástico; borrachas; e fibras (CANEVAROLO, 2002).

Estes três materiais no campo tecnológico apresentam comportamento mecânico distintos, utilizando o método de classificação pelo gráfico de tensão x deformação. O elastômero, comumente chamado de borracha, tem como característica principal a elasticidade, que apresenta deformação imediata quando submetida a pequenas tensões, apresentando alto alongamento e reversibilidade. O plástico divide-se em dois sub-grupos, o plástico rígido que se assemelha ao comportamento da fibra, que são resistentes a deformação e tem baixas porcentagens de alongamento, e o grupo de plásticos flexíveis que se enquadra como um grupo intermediário entre as fibras e as borrachas (LUCAS; SOARES; MONTEIRO, 2001).

A Figura 4 exemplifica as diferenças entre as curvas tensão x deformação dos grupos de materiais.

Figura 4 - Curvas de tensão x deformação típicas para um plástico rígido, uma fibra, um plástico flexível e um elastômero.



Fonte: Lucas, Soares e Monteiro (2001, p.26).

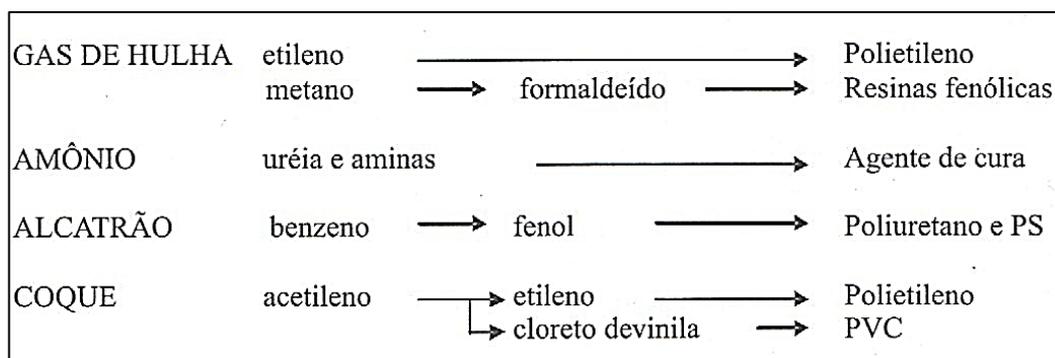
A origem da obtenção de matéria-prima para os monômeros são: petróleo e gás natural; produtos naturais; carvão; e o dióxido de carbono. O método mais barato de consecução da matéria é através do petróleo e do gás natural, resultante do processo de refinamento (MICHAELI, 1995).

Os produtos naturais foram os primeiros grupos a fornecer matéria prima ao homem, que através da natureza fornecem macromoléculas, as quais com a devida modificação geram polímeros. O maior exemplo é a borracha natural, proveniente do látex da seringueira, o óleo de mamona na produção do náilon 11 e o óleo de soja na produção do náilon 9 (CANEVAROLO, 2002).

o processo de destilação a seco produz inúmeros produtos, entre eles, o gás de hulha, amônio, alcatrão de hulha e resíduos denominados coque. Do gás, por meio de um processo de separação, é possível obter o etileno e o metano, da amônia é possível obter-se a uréia e aminas, que agem como cura para resinas epóxi. O alcatrão de hulha passa por um processo de destilação produzindo o benzeno, já do coque obtém-se por hidrogenação o etileno, e por reação de ácido clorídrico o cloreto de vinila (CANEVAROLO, 2002).

A Figura 5 ilustra o processo de obtenção de matéria prima para formação de polímeros.

Figura 5 - Esquema de obtenção de alguns polímeros a partir do carvão mineral

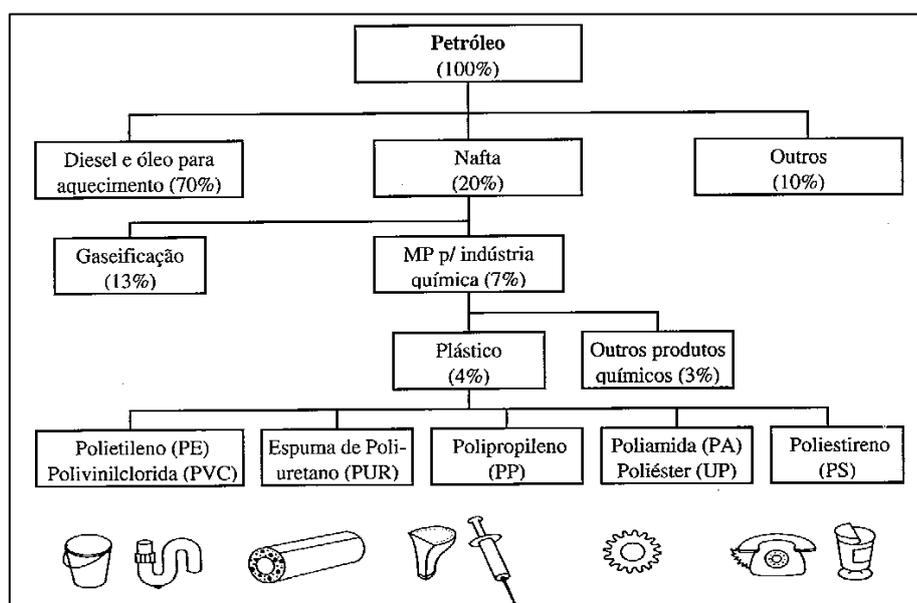


Fonte: Canevarolo (2002, p.32).

O petróleo é o mais importante produto na produção de matéria prima da indústria de vários seguimentos, inclusive da produção de monômeros, que por meio da destilação fracionada fornece a fração chamada de nafta, que gera frações gasosas contendo moléculas insaturadas: etileno; propileno; butadieno; buteno;

isobutileno; entre outros. As três primeiras moléculas são responsáveis por praticamente toda a indústria petroquímica de polímero, como mostrado na Figura 6 (CANEVAROLO, 2002).

Figura 6 - Divisão da matéria prima obtida do petróleo



Fonte: Michaeli (1995, p.16).

A polimerização, responsável pela ligação dos monômeros, é ligada por covalência, onde segundo Russel (1994) consiste no compartilhamento de um par de elétrons entre dois átomos ligados, o que significa que dois orbitais (um de cada átomo) se sobrepõe, ocupando simultaneamente ambos os orbitais.

A polimerização divide-se em dois métodos de ligação: adição; e condensação; que podem ser efetuados por diversas técnicas e processos diferentes. A poliadição, nome dado a polimerização por adição, ocorre de reações em cadeias sem formação de subproduto, e a policondensação, polimerização por condensação, são acompanhadas pela formação de subprodutos como água e gás carbônico (MANRICH, 2013).

A cadeia formada do polímero tem características distintas de acordo com seu peso molecular (PM), que é o parâmetro que governa as propriedades e como consequência seu emprego na indústria. Por este fator é comum caracterizar o polímero pelo peso molecular médio, pelo fato de que diferentes de algumas moléculas puras e simples como a água, o polímero não tem peso molecular único. A

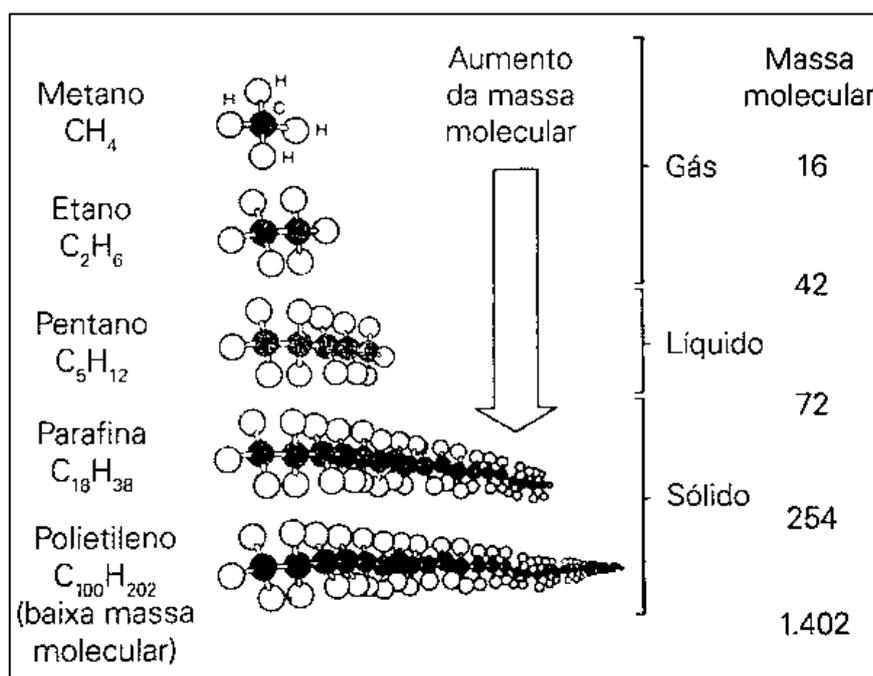
dispersão das moléculas dentro do polímero está ligada com o peso molecular da substância que o constitui, resultando em uma maior dispersão de pesos moleculares no aumento do número de substâncias (MANRICH, 2013).

A polidispersividade tem origem no processo de obtenção dos polímeros (polimerização), onde condições cinéticas como temperatura, viscosidade, concentração do iniciador, pressão e tempo influenciam na dispersão dos polímeros e suas respectivas propriedades (MANRICH, 2013).

O aumento do peso molecular, devido ao aumento da cadeia principal do elemento, resulta em maiores cadeias moleculares, alterando o comportamento do produto como os líquidos leves, que com o acréscimo tornam-se viscosos ou óleos, que em seguida tornam-se ceras em estado sólido e pouco consistentes, considerados sólidos flexíveis, que posteriormente tornam-se sólidos, que com o avanço crescente da cadeia, estas ficam tão longas que tem comportamento rígido e forte com elevada resistência a temperatura (LOKENS GARD, 2013).

A Figura 7 demonstra o aumento da cadeia principal e o seu respectivo aumento em massa molecular.

Figura 7 - Crescimento crescente de cadeia, partindo de uma molécula de gás até um plástico sólido



Fonte: Lokensgard (2013, p.45).

A Figura 8 explica a relação do peso molecular com a alteração das propriedades como a temperatura de fusão e de ebulição.

Figura 8 - Pontos de fusão e ebulição de diversas moléculas de hidrocarboneto

| Fórmula | Nome | Ponto de fusão, °C | Ponto de ebulição, °C |
|----------------------------------|--------------|--------------------|---|
| CH ₄ | Metano | -182,5 | -161,5 |
| C ₂ H ₆ | Etano | -183,3 | -88,6 |
| C ₃ H ₈ | Propano | -187,7 | -42,1 |
| C ₄ H ₁₀ | Butano | -138,4 | -0,5 |
| C ₅ H ₁₂ | Pentano | -129,7 | +36,1 |
| C ₆ H ₁₄ | Hexano | -95,3 | 68,7 |
| C ₇ H ₁₆ | Heptano | -90,6 | 98,4 |
| C ₈ H ₁₈ | Octano | -56,8 | 125,7 |
| C ₉ H ₂₀ | Nonano | -53,5 | 150,8 |
| C ₁₀ H ₂₂ | Decano | -30 | 174 |
| C ₁₁ H ₂₄ | Undecano | -26 | 196 |
| C ₁₂ H ₂₆ | Dodecano | -10 | 216 |
| C ₁₅ H ₃₂ | Pentadecano | +10 | 270 |
| C ₂₀ H ₄₂ | Icosano | 36 | 345 |
| C ₃₀ H ₆₂ | Triacontano | 66 | } destilado a pressão reduzida para evitar decomposição |
| C ₄₀ H ₈₂ | Tetracontano | 81 | |
| C ₅₀ H ₁₀₂ | Pentacontano | 92 | |
| C ₆₀ H ₁₂₂ | Hexacontano | 99 | |
| C ₇₀ H ₁₄₂ | Heptacontano | 105 | |

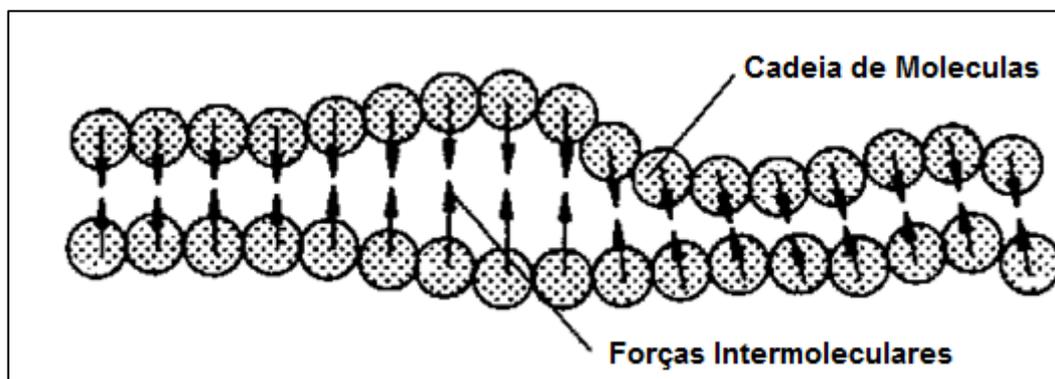
Fonte: Lokensgard (2013, p.45).

A estrutura formada pela ligação covalente, entre os monômeros, forma no caso de funcionalidade 2 uma cadeia linear, diferente da funcionalidade 3 e 4 que formam cadeias tridimensionais, essa organização de moléculas afeta diretamente o comportamento do polímero em sua deformação e resistência (VAN VLACK, 1970).

Construindo o formato dos polímeros bifuncionais a ligação das moléculas adjacentes (linhas) é feita pela força de ligação de Van der Waals, podendo ocorrer escorregamento entre as moléculas (Figura 9), diferentes dos polímeros trifuncionais e tetrafuncionais, nos quais este escorregamento não ocorre facilmente. Na formação do polímero uma variação comum é a ligação cruzada, onde cadeias adjacentes são

ancoradas umas nas outras, diminuindo conseqüentemente a movimentação entre as moléculas (VAN VLACK, 1970).

Figura 9 - Forças intermoleculares nas cadeias moleculares

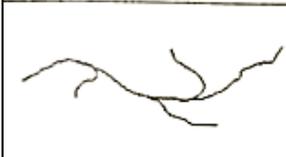
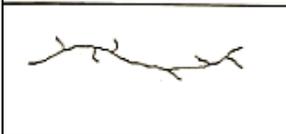
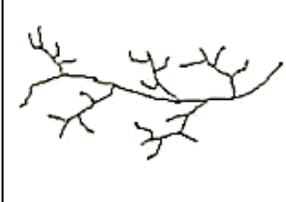
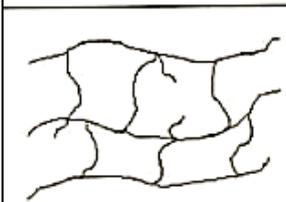


Fonte: Adaptado de Michaeli (1995, p.34).

Nos plásticos as ligações definem o comportamento da matéria que o constitui, divididos em termoplásticos (flexíveis) e termorrígidos (rígidos), estes diferenciam-se pela presença de ligações cruzadas abundantes nos termorrígidos, onde para quebrar esta ligação é necessário fornecer uma quantidade alta de energia suficiente para destruir por consequência a cadeia polimérica, sendo assim quando aquecido não há alteração do estado físico, não se tornando maleável, infusível e insolúvel. Ao contrário do termoplástico que no aumento de temperatura tem a capacidade de amolecer e fluir, com alteração física reversível, sendo fusíveis, solúveis e possibilitando a reciclagem (CANEVAROLO, 2002).

A arquitetura da molécula é fixada pela ligação química do elemento, podendo ser de três tipos: linear; ramificada; e reticulada. A reticulada se caracteriza pela ligação cruzada formando uma rede ou retículo, e a ramificada se distingue da linear por deter ramificações na estrutura base do polímero, salientando que a ramificação não se refere ao grupo linear que contém grupos laterais que fazem parte da estrutura do monômero, apenas aos que contenham uma estrutura monomérica completa em ligação com o eixo principal do polímero (LUCAS; SOARES; MONTEIRO, 2001). A Figura 10 especifica as formas moleculares.

Figura 10 - Arquitetura molecular e definição da estrutura

| | | |
|--|-------------------|--|
|  | Linear | Formado pelas ligações dos monômeros em um comprimento contínuo. |
|  | Ramificado tipo A | Arquitetura tipo pente, com ramificações longas. |
|  | Ramificado tipo B | Arquitetura tipo pente, com ramificações curtas. |
|  | Ramificado tipo C | Estrutura dendrítica, na qual as ramificações também apresentam ramificações. |
|  | Reticulado | Estruturas nas quais as cadeias poliméricas estão ligadas entre si, formando uma rede ou retículo. |

Fonte: Lucas, Soares e Monteiro (2001, p.17).

2.2 Termorrígidos

O plástico termorrígido, ou termofixo, tem suas moléculas ligadas em redes umas às outras, por ligação cruzada, formando uma espécie de molécula gigante como forma molecular reticulada, sendo teoricamente possível que grandes objetos como capas de caminhões a diesel, sejam na verdade uma molécula imensa (LONKENS GARD, 2013).

Mesmo com a palavra termorrígido sendo autoexplicativa, a mesma abre seu conceito para duas categorias com comportamentos distintos, os termofixos rígidos e os flexíveis. Os primeiros caracterizam-se pelo não amolecimento na presença do calor e pela forte ligação química entre seus elementos, resultando em uma grande resistência a solventes, já os flexíveis, têm sua história intimamente ligada a vulcanização da borracha por Charles Goodyear, que descobriu como realizar ligações cruzadas em borrachas pelo acréscimo de enxofre no processo, e o

poliuretano, espuma formada através do uretano em ligações cruzadas (LONKENSARD, 2013).

Processos para fabricação de itens de consumo, tem por políticas de reciclagem, focado em outros tipos de plásticos que tem propriedade de reutilização na cadeia produtiva, pois os termorrígidos não podem ser reciclados ou reprocessados, não possibilitando que um pneu de borracha possa ser cortado e reprocessado para ser um pneu novamente (LONKENSARD, 2013).

O termo reciclagem, segundo eCYCLE, caracteriza o processo de conversão de resíduos sólidos pela modificação do estado físico, físico-químico ou biológico para posterior utilização do produto final em matéria-prima ou produto novo, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/10, que procura organizar e garantir transparência no gerenciamento de resíduos.

Porém a afirmação de que os termorrígidos não podem ser reciclados ou reprocessados é dita em comparação a reciclagem dos termoplásticos, especificando que o resíduo não pode voltar a ser um produto novo de origem. Para utilização em outros meios, segundo como no caso dos pneus que após a trituração, passam por um separador magnético para a retirada o metal, e em outra etapa ocorre a retirada de tecidos, por fim obtém-se somente compostos da borracha, com uso na fabricação de pisos, sola de calçado e na indústria do asfalto (PORTAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, 2017).

2.3 Termoplásticos

A etimologia da palavra termoplástico tem origem da palavra *termos*, que significa calor, e *plasto* de maleável, devido ao enfraquecimento das forças intermoleculares sobre a ação do calor, tornando-o maleável. São segmentados em termoplásticos amorfos e semi-cristalinos, discernindo pela arquitetura da molécula ramificada (MICHAELI, 1995).

2.3.1 Termoplásticos Amorfos

A estrutura molecular amorfa, ou não cristalina, não apresenta regularidade interna, não possibilitando um estado de empacotamento denso, possuindo cadeias

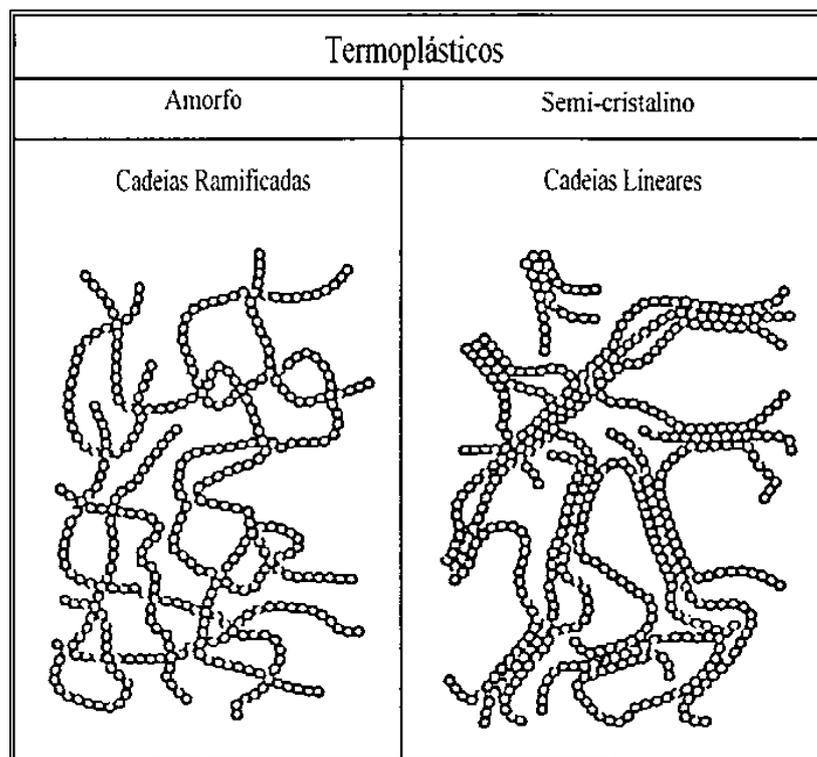
moleculares fortemente ramificadas e cadeias secundárias longas (Figura 11). Tem como propriedade um estado incolor, com denominação de vidros sintéticos e orgânicos, como no caso do CD (MICHAELI, 1995).

Com base em Cowie e Hall (1991) e Canevarolo (2002), Tschiptschin, Toffoli e Valera (2016?), o polímero que tem toda sua estrutura amorfa possui apenas uma temperatura de transição vítrea (glass transition temperature), T_g , no qual de acordo com a temperatura ambiente, T_{amb} , apresenta diferentes estados físicos:

- $T_{amb} < T_g$ – Estado Sólido;
- $T_{amb} > T_g$ – Estado “borrachoso”;
- $T_{amb} \gg T_g$ – Viscosidade diminui \propto Aumento da Temperatura até a degradação.

De acordo com os mesmos autores, comumente a utilização do termoplástico amorfo é no estado sólido, portanto é habitual que a temperatura de transição vítrea seja maior que a temperatura ambiente.

Figura 11 - Estrutura do termoplástico amorfo e semicristalino



Fonte: Michaeli (1995, p.42).

2.3.2 Termoplásticos semicristalinos

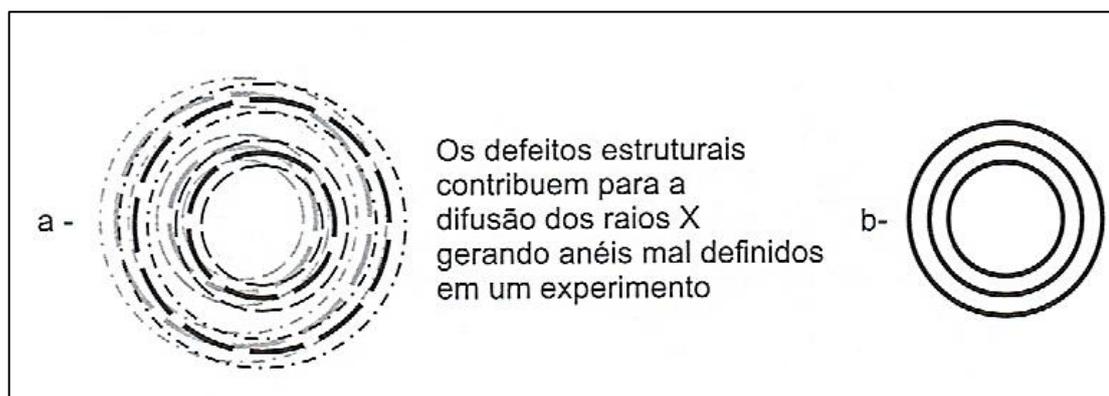
A cristalização de cadeias moleculares funciona como ponto de ancoragem de um sistema como um todo, podendo ter várias moléculas em um único cristalito, que pode estar presente no polímero em estado sólido ou em solidificação, podendo ser formado por moléculas que se dobras sobre si e igualmente se empilham umas sobre as outras (MANRICH, 2013).

As macromoléculas apresentam pequenas ramificações, e conseqüentemente poucas cadeias secundárias, então existem regiões ordenadas nas cadeias de moléculas individuais, que são densamente compactadas. A área que tem estados de organização elevada denomina-se região cristalina ou de cristalização, porém nos polímeros as longas cadeias se entrelaçam e resultam em uma não cristalização completa, resultando a classificação como termoplásticos semicristalinos (MICHAELI, 1995).

Portanto em polímeros de cadeias longas as áreas amorfas e cristalinas coexistem, apresentando estado incolor, pouco turvo ou opaco a luz nas regiões limite entre regiões amorfas e cristalinas (MICHAELI, 1995).

O conceito de cristalização não é o mesmo aplicado na metalurgia, os metais apresentam compostos de rede cristalina contínua (Figura 12-b) ao contrário dos polímeros que apresentam cristais não uniformes e regiões amorfas (Figura 12-a), que diretamente dependem da configuração da posição dos átomos na cadeia, da conformação do local em formato zigzag ou helicoidal e ao empacotamento molecular (MANRICH, 2013).

Figura 12 - Anéis obtidos por difração de raio x em polímero com presença de cristais dispersos e imperfeitos (a) e em metais cristalinos (b)



Fonte: Manrich (2013, p.38).

As propriedades de um polímero semicristalino são dependentes do grau de cristalinidade, que por definição é uma fração volumétrica. Parte-se do princípio que só existem duas fases no polímero, a amorfa e a cristalina, tal consideração leva em conta a existência de zonas de transição entre as duas fases, medindo-se na verdade o índice de cristalinidade, que depende da técnica utilizada para o experimento (CANEVAROLO, 2002).

Desta forma o cálculo do grau de cristalinidade real de um material pode ser obtido por meio de uma propriedade, sendo ela o volume específico do material, a entalpia de fusão ou o calor específico à pressão constante. A Equação 1 determina o efeito da cristalinidade para um valor intermediário entre os valores extremos na fase amorfa pura e pelo cristal (CAENVAROLO, 2002).

$$P^i = \phi \overline{P}_c^i + (1 - \phi) \overline{P}_a^i \quad \dots(1)$$

Onde: P^i = intensidade de uma dada propriedade;

\overline{P}_c^i = intensidade parcial da fase cristalina;

\overline{P}_a^i = intensidade parcial da fase amorfa;

ϕ = grau de cristalinidade.

O volume específico torna-se mais sensível a fase cristalina pelo fato de que quanto mais cristalino o material, mais empacotadas as cadeias serão e por tanto mais densas, desta forma a medida de volume específico pode ser facilitada e barateada pela substituição do volume pela densidade, o grau de cristalinidade é obtido por meio da Equação 2 (CANEVAROLO, 2002).

$$\phi^{SV} = \frac{\overline{v}_a - \overline{v}}{\overline{v}_a - \overline{v}_c} = \frac{\rho_c (\rho_a - \rho)}{\rho (\rho_a - \rho_c)} \quad \dots(2)$$

Onde: \overline{v}_a : volume específico da fase amorfa;

\overline{v} : volume específico da amostra;

\overline{v}_c : volume específico da fase cristalina;

ρ_c : densidade da fase cristalina;

ρ_a : densidade da fase amorfa;

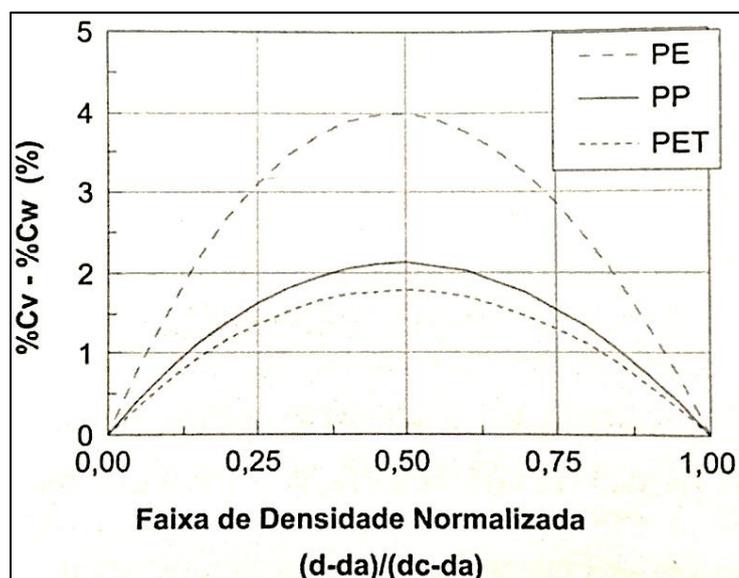
ρ : densidade da amostra;

ϕ^{SV} : grau de cristalinidade por volume específico.

Para a obtenção dos volumes específicos a produção da fase amorfa na temperatura ambiente deve ser obtida por resfriamento rápido, evitando assim a cristalização, ou pela extrapolação do valor de volume específico no estado fundido para a temperatura ambiente, sendo um problema a obtenção em ambos os casos. O volume específico cristalino pode ser calculado pelo conhecimento da célula unitária do polímero e seus parâmetros de rede. No caso da utilização da densidade pela facilidade experimental, o valor deve ser corrigido devido ao erro em comparação aos valores reais de volume específico (CANEVAROLO, 2002).

A Figura 13 apresenta o fator de conversão das duas propriedades a partir do volume específico (%Cv) e da densidade (%Cw) em uma faixa de densidade normalizada $((d-d_a)/(d_c-d_a))$ apresentada entre zero e um.

Figura 13 - Fator de conversão de volume específico para densidade normalizada



Fonte: Canevarolo (2002, p.98).

A Tabela 1 apresentam alguns valores específicos de densidade e volumes de alguns polímeros comerciais.

Tabela 1 – Volume específico e densidade da fase amorfa e cristalina de alguns polímeros

| Polímero | Volume Específico (cm ³ /g) | | Densidade (g/cm ³) | |
|-------------------------------|--|---------|--------------------------------|---------|
| | Fase amorfa | Cristal | Fase amorfa | Cristal |
| Poliétileno (PE) | 1,176 | 0,9891 | 0,85 | 1,011 |
| Polipropileno isotático (Ppi) | 1,163 | 1,068 | 0,86 | 0,936 |
| Poliétileno Tereftalato (PET) | 0,749 | 0,687 | 1,335 | 1,455 |

Fonte: Adaptado de Canevarolo (2002, p.98).

A segunda propriedade na obtenção do grau de cristalização é a entalpia de fusão, por sua fácil obtenção utilizando calorímetros comerciais (DSC), medido pela área sob o pico de fusão da amostra, partindo da sua normalização com entalpia de fusão da fase cristalina (CANEVAROLO, 2002).

A Equação 3 determina o cálculo do grau de polimerização por entalpia de fusão.

$$\phi^H = \frac{H_a - H}{H_a - H_c} = \frac{\Delta H}{\Delta H^o} \quad \dots(3)$$

Onde: H_a : entalpia de fusão da amostra amorfa;

H : entalpia de fusão da amostra;

H_c : entalpia de fusão da amostra cristalina;

ΔH : variação da entalpia de fusão da amostra;

ΔH^o : variação da entalpia de fusão da fase cristalina;

ϕ^H : grau de cristalização por entalpia de fusão.

A Tabela 2 exemplifica algumas entalpias de fusão de polímeros comerciais.

Tabela 2 - Entalpia de Fusão de alguns polímeros

| Polímero | MM mero | Entalpia de fusão | |
|--------------|---------|-------------------|--------|
| | | J/g | kJ/mol |
| Poliamida 11 | 116 | 224 | 25,98 |
| Poliamida 12 | 130 | 95 | 12,35 |
| Poliamida 6 | 48 | 190 | 9,12 |

...continua

...continuação

| Polímero | MM mero | Entalpia de fusão | |
|--|------------|-------------------|--------|
| | | J/g | kJ/mol |
| Poliamida 6,10 | 148 | 209 | 30,93 |
| Poliamida 6,6 | 92 | 195 | 17,94 |
| Poliacrilonitrila (PAN) | 53 | 98 | 5,19 |
| Polibutadieno (PB) | 54 | 128 | 6,91 |
| Polibutileno tereftalato (PBT) | 220 | 142 | 31,24 |
| Policarbonato (PC) | 238 | 145 | 34,51 |
| Polieter-eter cetona (PEEK) | 288 | 130 | 37,44 |
| Polietileno | 28 | 290 | 8,12 |
| Polietileno tereftalato (PET) | 192 | 140 | 26,88 |
| Polimetilmetacrilato (PMMA) isotático | 50 | 96 | 4,8 |
| Poliacetal (POM) | 30 | 390 | 11,7 |
| Polietileno óxido | 44 | 185 | 8,14 |
| Polipropileno isotático (Ppi) | 42 | 165,3 | 6,94 |
| Polipropileno sindiotático (PPs) | 42 | 50 | 2,1 |
| Poliestireno isotático (PSi) | 104 | 86 | 8,94 |
| Politrafluoroetileno (PTFE) | 100 | 82 | 8,2 |
| Poliacetato de vinila (PVA) | 86 | 137 | 11,78 |
| Polialcoolvinílico (Pval) | 44 | 156 | 6,86 |
| Policloreto de vinila (PVC) | 62,5 | 176 | 11 |
| Polifluoreto de vinilideno PVDF | 64 | 105 | 6,72 |
| Polifluoreto de vinila (PVF) | 47 | 164 | 7,71 |

Fonte: Adaptado de Canevarolo (2010, p.99).

O calor específico também é uma propriedade da qual pode-se obter o grau de cristalinidade, através da calibração do calorímetro comercial com uma amostra padrão de safira, onde se conhece o valor específico deste óxido (CANEVAROLO, 2002).

A Equação 4 relaciona o calor específico e o grau de cristalinidade.

$$\phi^c = \frac{(C_p)_a - C_p}{(C_p)_a - (C_p)_c} \quad \dots(4)$$

Onde: $(C_p)_a$: calor específico a pressão constante da amostra totalmente amorfa;

$(C_p)_c$: calor específico a pressão constante da amostra totalmente cristalina;

C_p : calor específico a pressão constante da amostra;

ϕ^c : grau de cristalização por calor específico a pressão constante.

Por meio de experimentos é possível determinar os graus de cristalização de um mesmo produto em diferentes pontos, como forma indicativa pode-se citar a garrafa PET, onde busca-se alta resistência a pressão interna, e por questões econômicas é necessário que a parede da garrafa seja a mais fina possível e transparente, por ser um material que substitui o vidro. Na Tabela 3 é possível verificar a diferença entre os graus de cristalinidade do PET em diferentes pontos da garrafa e do grão de PET empregado em fiação. Como a resistência está ligada diretamente com a cristalização, é necessário que o politereftalato de etileno seja parcialmente cristalizado e esta porcentagem não deixe o material incolor. Portanto é alterado a cinética da cristalização do material, diminuindo a velocidade de cristalização e seu valor máximo, no caso da garrafa de PET é utilizada a copolimerização em etapas com o etileno glicol e ácido tereftálico, o qual sofre uma substituição em pequena parcela pelo ácido isoftálico, tal mudança garante a diminuição na cristalização, retardando o grau de cristalização em no máximo 35%, resultando em um material semicristalino, transparente e de alta resistência (CANEVAROLO, 2002).

Tabela 3 - Grau de cristalinidade de PET processado

| PET | Posição | Densidade (g/cm ³) | Vol. Específico (cm ³ /g) | Grau de cristalinidade (%) |
|--------------------------------|---------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Garrafa descartável (2 litros) | Gargalo | 1,341 | 0,746 | 5 |
| | Corpo | 1,366 | 0,732 | 30 |
| Grãos para fiação | Grãos | 1,402 | 0,713 | 60 |

Fonte: Adaptado de Canevarolo (2010, p.99).

O emprego do PET em fiação não exige a necessidade de transparência, onde a taxa de cristalização pode chegar ao seu máximo pelo tamanho da cadeia de aproximadamente 60% (CANEVAROLO, 2002).

2.3.3 Cristalinidade e propriedades

As propriedades estão ligadas diretamente com a cristalinidade, como já salientado, entretanto o tamanho dos cristais e sua distribuição afetam determinadas propriedades mais do que outras, como:

- Módulo elástico;
- Tempo de relaxação;
- Temperatura de transição vítrea;
- Volume específico e coeficiente de expansão térmica;
- Solubilidade;
- Permeabilidade a gases e vapores;
- Propriedades ópticas.

2.3.3.1 Módulo elástico

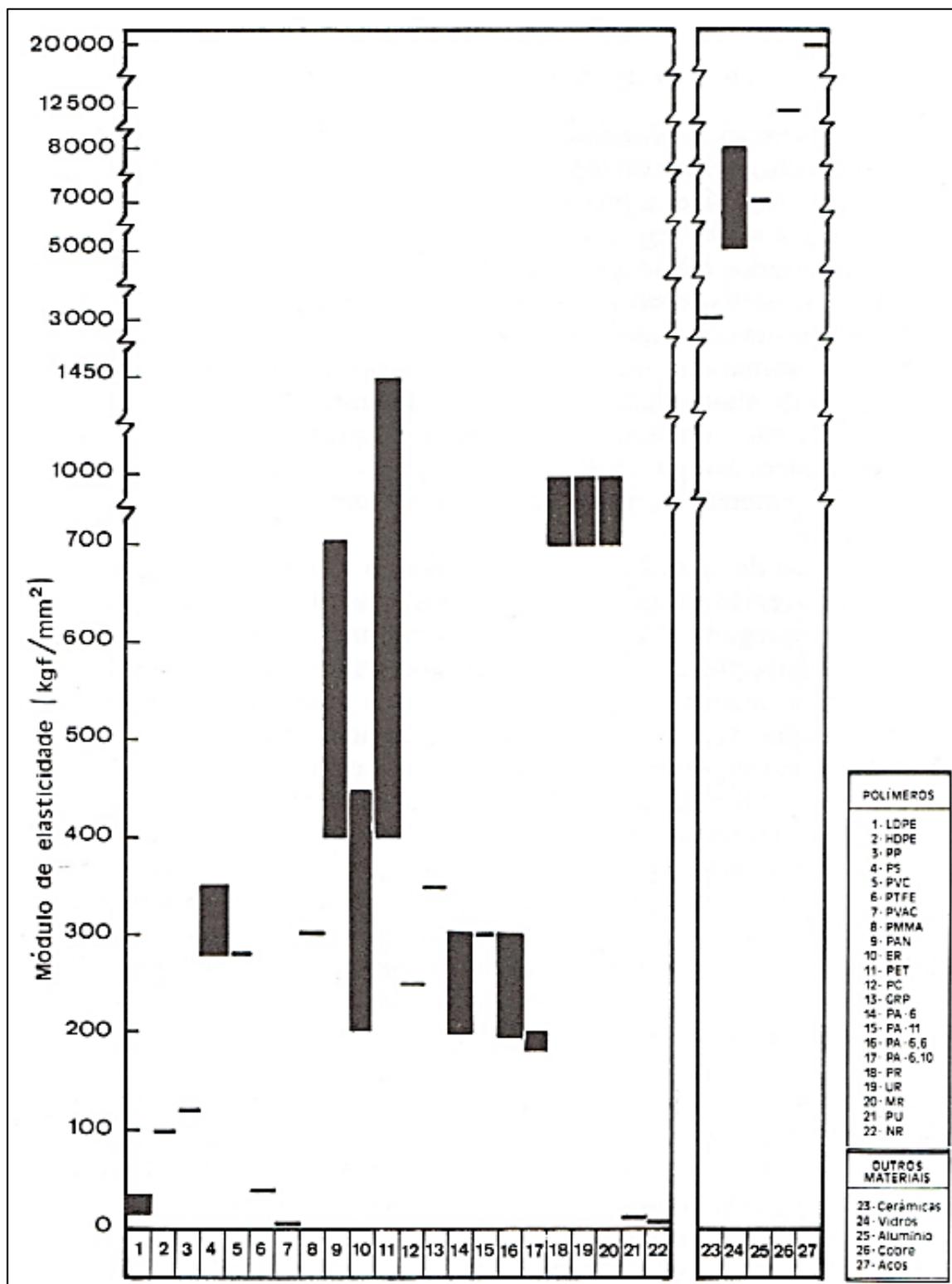
O módulo de elasticidade, chamado também de módulo de Young, é a relação entre a tensão e a deformação, dentro do limite elástico, onde a deformação é totalmente reversível e proporcional a tensão (MANO, 1991).

Cristais tem maior resistência a deformação, e, portanto, maior módulo de deformação, polímeros com formato de cadeia ziguezague apresentam maior sensibilidade a variação de cristalização em relação ao módulo de elasticidade (MANRICH, 2013).

No caso de polímero pouco cristalino, ou que esteja com temperatura ambiente maior que a temperatura de transição vítrea, ocorre maior escoamento, denominado creep, resultando em deformações maiores, ou até mesmo no escoamento em relação a seu peso próprio, chamado de cold flow. A recuperação da peça é avaliada de acordo com as dimensões originais em percentual (MANO, 1991).

A Figura 1 apresenta os módulos de elasticidade de diversos polímeros.

Figura 14 - Módulo de Elasticidade de diversos materiais a 20-25°C



Fonte: Mano (1991, p.11).

2.3.3.2 Tempo de relaxação

O tempo de relaxação é inversamente proporcional ao módulo de elasticidade e diretamente a viscosidade do polímero, aumentando com a restrição dos movimentos das cadeias na região de fronteira com a fase amorfa e cristalina. Portanto quanto menor a viscosidade menor é o módulo de elasticidade, e por consequência menor o tempo das moléculas voltarem ao seu estado estável após solitação (MANRICH, 2013).

2.3.3.3 Temperatura de transição vítrea

Com base em Cowie e Hall (1991) e Canevarolo (2002), Tschiptschin, Toffoli e Valera (2016?), a temperatura de transição vítrea é onde iniciam-se as rotações internas nas cadeias poliméricas, associada à região amorfa, por aumento dos vazios na matriz permitindo que ocorram as rotações. Como as rotações iniciam-se em um intervalo de temperatura é possível que haja a denominação de intervalo de temperatura de transição vítrea.

Segundo os mesmos autores, a transição vítrea é interpretada como dois processos, o primeiro termodinâmico, onde segundo a classificação de Ehrenfest, os potenciais químicos ou energia livre de Gibbs, energia utilizada para quantificar a espontaneidade da reação, das duas fases são iguais se estiverem em equilíbrio termodinâmico, podendo ser uma transição de primeira ordem ou de segunda ordem. Para o campo de termodinâmica a temperatura de transição vítrea só é igual a ponto de configuração onde a entropia total atinge o valor zero em condições adequadas satisfazendo condições de equilíbrio.

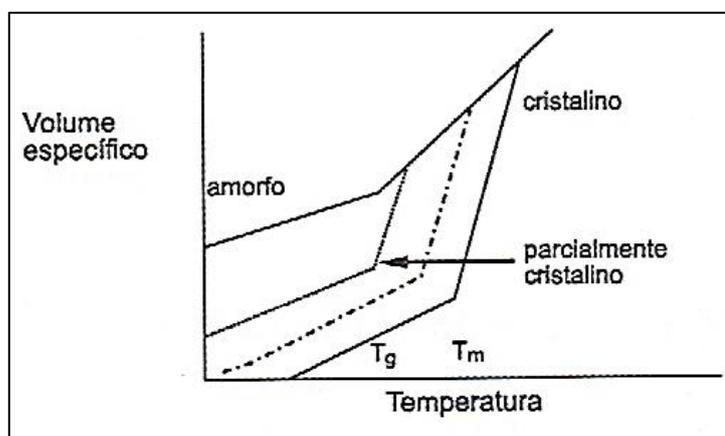
Dando continuidade, o modelo cinético, denominado de modelo cinético de Kauzmann, define a transição vítrea como estado líquido, com alguns graus de liberdade congelado, apresentando descontinuidade no coeficiente de expansão térmica a uma referente temperatura.

Em alguns polímeros, como o PET, o grau de cristalinidade aumenta a temperatura de transição vítrea em 5% a 15% (MANRICH, 2013).

2.3.3.4 Volume específico e coeficiente de expansão térmica

A descontinuidade no coeficiente de expansão térmica obtida na temperatura de transição vítrea torna toda variação de temperatura depois do ponto de descontinuidade uma maior variação do volume específico. A cristalinidade, entretanto, diminui o volume específico na faixa de temperatura na região de transição de fases, como pode ser verificado na Figura 15 (MANRICH, 2013).

Figura 15 - Coeficiente de expansão térmica dos polímeros é sensível ao grau de cristalinidade.



Fonte: Manrich (2013, p.41).

2.3.3.5 Solubilidade

O aumento de regiões cristalinas diminui a solubilidade dos polímeros, os quais quando cristalinos necessitam de energia extra para ser solubilizados. A solubilidade ocorre quando a energia livre de Gibbs é menor que zero, o que dificulta a interação dos polímeros cristalizados com aditivos, que quando adicionado diminui a cristalinidade e a T_g (MANRICH, 2013).

2.3.3.6 Permeabilidade a gases e vapores

Propriedade necessária e importante para embalagens, a permeabilidade é pequena em polímeros, e ocorre pelo transporte de partículas em poros permanentes ou transitórios da membrana intersticialmente, ou por meio de difusão por um

processo de sorção ou dissolução e posterior dessorção ou evaporação no outro lado (MANO, 1991).

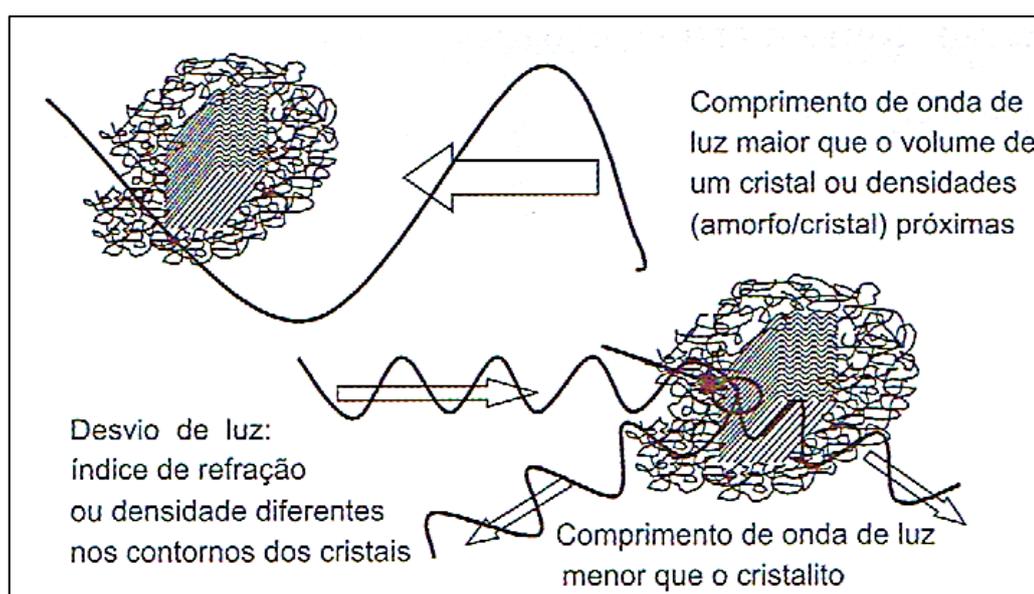
A permeabilidade ocorre nas regiões amorfas, onde as macromoléculas estão mais afastadas, medida através da quantidade de material permeante transferido na unidade de tempo e de área, com uma diferença de pressão entre as fases de 1 cmHg, com resultado em volume ou em massa (MANO, 1991).

É dependente da temperatura, do peso molecular, da morfologia, bem como a interação entre o polímero e o agente que o permea. O politereftalato de etileno por apresentar cadeias longas pela condensação, permite que o polímero seja altamente impermeável, sendo ótimas embalagens para produtos gaseificados (MANO, 1991).

2.3.3.7 Propriedades óticas

Polímeros amorfos puros tem a característica de serem transparentes, e os cristalinos dependendo do grau de cristalinidade podem ser translúcidos, opacos ou em casos especiais transparentes. A Figura 16 demonstra o efeito da interface entre um cristal pequeno e um grande na passagem da onda de luz, determinando que o tamanho do cristal também influencia nas propriedades óticas (MANRICH, 2013).

Figura 16 - Transparência de polímeros cristalinos depende do tamanho dos cristalitos.



Fonte: Manrich (2013, p.42).

2.4 Politereftalato de Etileno

Conhecido comercialmente pela sua abreviação PET, o politereftalato de etileno é o poliéster mais famoso pela sua versatilidade e grande resistência mecânica, foi desenvolvido nos laboratórios da DuPont pelos químicos britânicos Whinfield e Dickson, através da reação de glicóis e ácidos dibásicos (SIMIELLI e SANTOS, 2010).

No desenvolvimento obteve-se um grande número de poliésteres com peso molecular baixo de 2.500 a 5.000, sem nenhuma propriedade atrativa ao comércio, porém com a utilização da reação de condensação, por meio da eliminação da molécula de água, na formação do mero, foi possível obter um poliéster de peso molecular de até 25.000, denominado de “superpoliésteres”, que tinham estado sólido, opaco, com temperatura de fusão elevada e eram tenazes. Quando solidificados os filamentos podiam ser estirados muitas vezes em comparação ao seu comprimento original, tornando-se brilhantes, com alta resistência a tração e alta elasticidade (SIMIELLI e SANTOS, 2010).

Ensaio feitos de raio-X mostraram que as fibras detinham grau de orientação dos moléculas e alta cristalinidade. Tornando-o um ótimo produto de matéria-prima para a indústria têxtil e de garrafas (SIMIELLI e SANTOS, 2010).

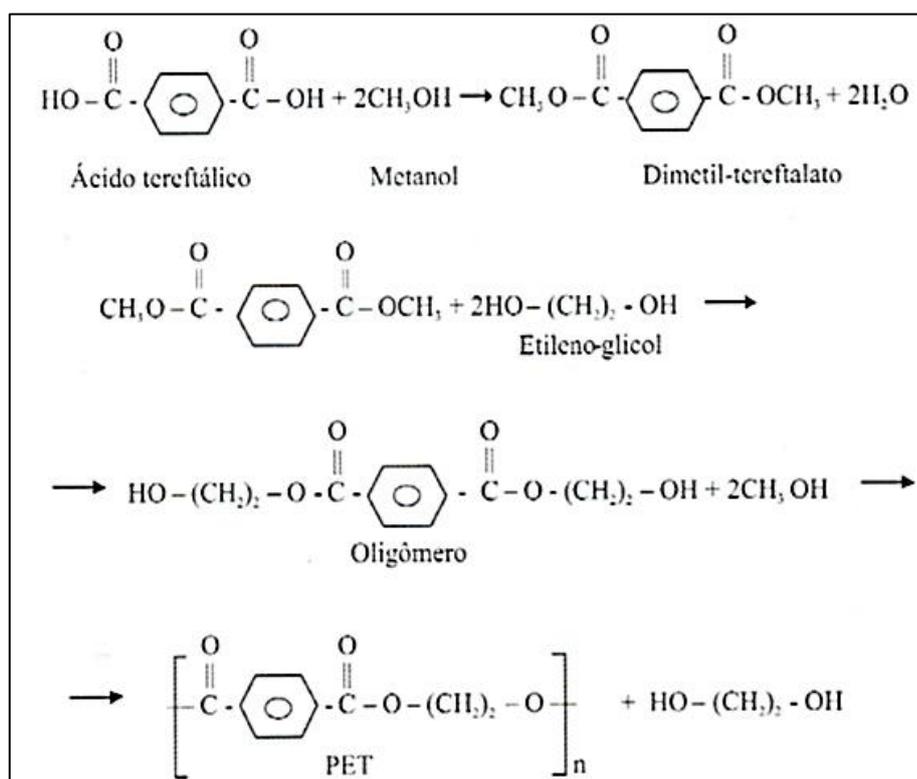
A obtenção dos poliésteres, pela não formação de sais na reação e pela dificuldade na purificação de ácidos dibásicos, pela baixa solubilidade e alto ponto de fusão resulta em o ponto de equilíbrio da reação bem menos favorável do que em poliamidas similares. Esta situação é compensada pela velocidade na reação de esterificação (SIMIELLI e SANTOS, 2010).

O ácido tereftálico é convertido para o dimetil-éster, que tem a facilidade na purificação por destilação ou cristalização, reagindo assim com o glicol, ocorrendo em duas etapas. A primeira é realizada para a obtenção dos grupos hidroxilas nas extremidades das cadeias pelo excesso de glicol, resultando em um polímero de baixo peso molecular. Já a segunda, ocorre com temperatura elevada e pressão reduzida condensando as moléculas e eliminando o glicol, resultando em polímeros com peso molecular numérico médio de 23.000 a 50.000 e peso molecular de massa médio entre 36.000 e 90.000. Após a polimerização o resultado é resfriado deixando o reator

abaixo da temperatura de transição vítrea, sendo que a cristalinidade desenvolve durante o aquecimento posterior (SIMIELLI e SANTOS, 2010).

A Figura 17 demonstra o processo de obtenção do PET.

Figura 17 - Reação de obtenção do PET a partir do ácido tereftálico.

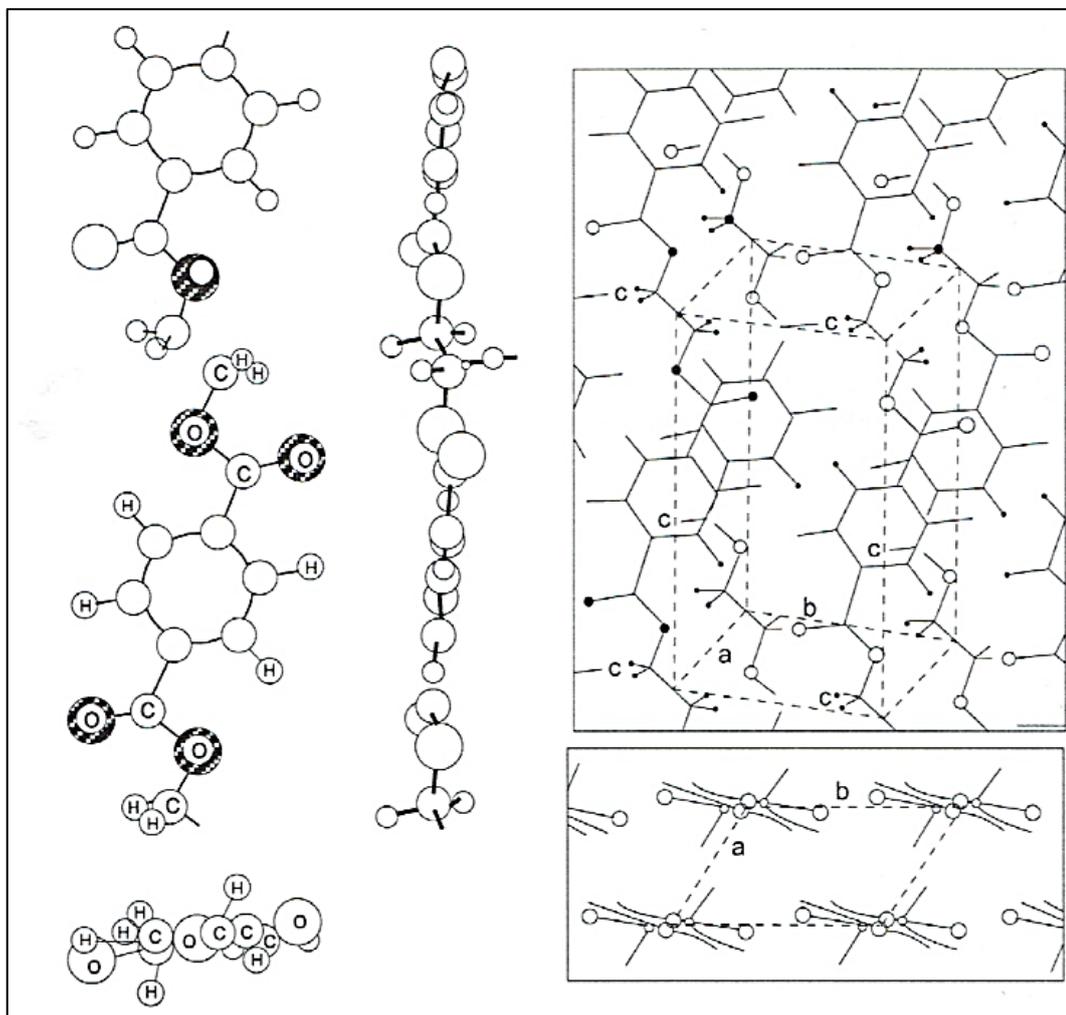


Fonte: Simielli e Santos (2010, p.79).

O grupamento do ácido tereftálico tem um pequeno ângulo com o eixo de cadeia polimérica, permitindo assim o maior empacotamento e com isso maior densidade (CANEVAROLO, 2002).

A Figura 18 demonstra a conformação da molécula de PET na fase cristalina e de sua célula unitária, demonstrando o ângulo da ligação.

Figura 18 - Conformação da molécula de PET na fase cristalina e na sua célula unitária.



Fonte: Canevarolo (2010, p.106).

No poliéster a ligação de carbono e oxigênio (C-O) permite a rotação da molécula em torno de ligações saturadas, garantindo assim a maior elasticidade da cadeia. A elasticidade tem grande relação com o ponto de fusão nos ésteres, pelo fato da barreira de energia potencial, que impede a rotação, ser da mesma ordem de grandeza das forças moleculares de coesão (SIMIELLI e SANTOS, 2010).

No estado sólido o PET tem conformação da cadeia polimérica em ziguezague planar, onde cadeias lineares, sem grupos laterais, podem se empacotar de maneira regular, mantendo ângulos e distâncias constantes.

O PET tem alta resistência mecânica, peso a peso, tem maior resistência do que o aço. Com taxa de cristalização no caso de garrafas, de cerca de 30%, tem a propriedade de ser transparente e apresentar estabilidade térmica, com alta

resistência a ruptura, perfuração, rasgo e abrasão, sendo ideais para moldagem a sopro e extrusão (MARINHO, 2005).

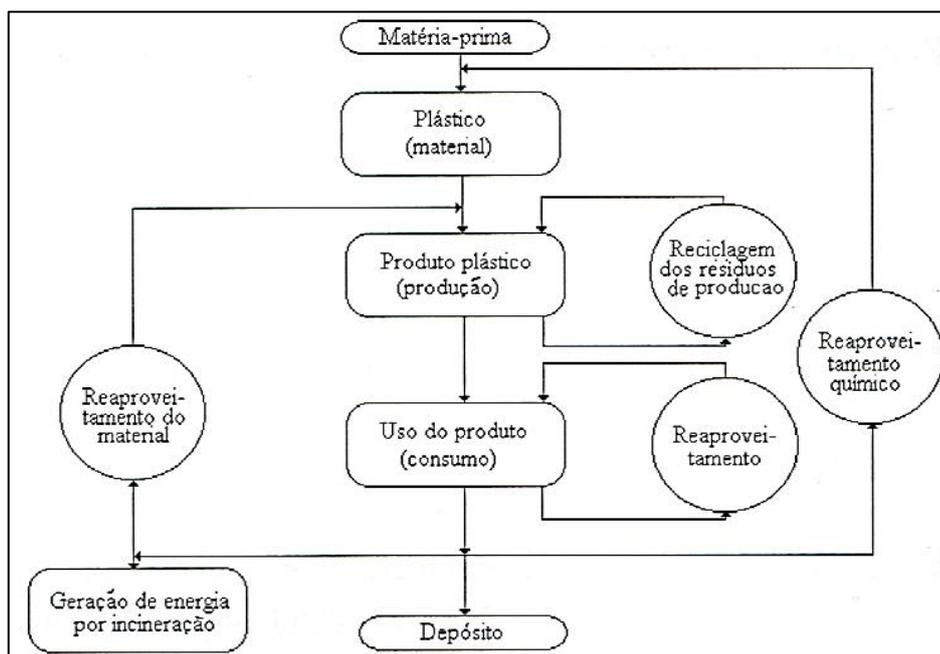
Segundo Marinho (2005) apresentam boa resistência até a temperatura de 175°C, e em uso contínuo a temperatura de 140°C para aplicações que sejam necessárias resistência a impacto e propriedades dielétricas.

Por ser um termoplástico semicristalino e com escasso valor comercial, o PET pela sua grande produção requer uma reciclagem em âmbito mundial, permitindo que o lixo existente tenha novamente utilização e através da preparação do mesmo haja novamente produção itens de consumo (MICHAELI, 1995).

O ciclo de reciclagem é dividido em grandes e pequenos ciclos, onde existe o reaproveitamento, a reciclagem dos produtos de produção ou a geração de energia por meio do material descartado (MICHAELI, 1995).

A Figura 19 demonstra o ciclo de reciclagem.

Figura 19 - Ciclo de reciclagem



Fonte: Michaeli (1995, p.180).

A limpeza na reciclagem da PETG, termo dado ao PET destinado a garrafas, é imprescindível, pelo fato de que algumas apresentam resquícios de óleos e sujeiras, ambos podem prejudicar a ligação entre a fibra e a matriz onde será aplicado, principalmente se essa matriz for cimentícia, que em contato com óleo modifica a

trabalhabilidade e o comportamento no estado fresco, podendo gerar segregação dos agregados.

A indústria têxtil é a maior consumidora do produto de reciclagem do PET, em qualquer lugar do mundo, permitindo que o valor pago pela sucata seja atrativo durante o ano todo, o que produz incentivo para atividades de coleta, cooperativas e seus respectivos catadores, o que garante que a ausência de coleta seletiva não seja um grande problema no processo de reciclagem no Brasil (ABIPET – site 10/06/2016).

A inclusão deste material como opção de agregado ou como fibra na construção civil é uma alternativa recente, que visa a melhoria das propriedades mecânicas de tração e de menores deformações, e conseqüentemente de fissuração na matriz, além de garantir benefícios ambientais no seu emprego, existindo uma economia de recursos naturais como a água e energia utilizados no processo de produção do polímero. O processo de corte em filetes da garrafa vem sendo aplicado para produção de vassouras e artesanatos.

A identificação dos plásticos e constituintes das embalagens se torna um ponto importante devendo sempre ser verificada para a possibilidade de reciclagem e separação de cada tipo de plástico, a identificação do PET é pelo número um, como descrito na Figura 20.

Figura 20 - Identificação dos códigos recomendado pelo instituto de garrafas

| Código | Material |
|-------------|-------------------------------------|
| 1 PET | Polietileno tereftalato (PET)* |
| 2 HDPE | Polietileno de alta densidade |
| 3 V | Cloreto de vinila/polivinila (PVC)* |
| 4 LDPE | Polietileno de baixa densidade |
| 5 PP | Polipropileno |
| 6 PS | Poliestireno |
| 7 Outros | Todas as outras resinas |

Fonte: Logensgard (2013, p.24).

Para a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (Abiplast), o processo de reciclagem deve ser dividido por ordem de prioridade, iniciando no PET transparente, depois pelo azul suave, em seguida pelo translucido azul e verde e por último o PET âmbar e vermelho.

2.5 Matriz e Interface de Ligação

O material compósito, ou composite, é produto da união de um elemento de reforço e de uma matriz, tendo o reforço a função de melhorar as propriedades físicas, químicas ou reológicas para o produto final da mistura.

Segundo Bentur e Mindess (2007), as propriedades dos materiais de cimento reforçados com fibra dependem da estrutura do compósito, em relação ao seu desempenho em várias condições de carregamento, e a caracterização da estrutura interna, portanto devem ser considerados três componentes:

- Matriz cimentícia;
- Forma e distribuição das fibras;
- Interface fibra-matriz.

2.5.1 Matriz Cimentícia

A matriz de cimento Portland, pode ser dividida em grupos dependendo dos agregados utilizados na mistura, quando utilizado apenas cimento e água na ausência de areia a massa é denominada de pasta, quando adicionada a areia passa a ser chamada de argamassa e adicionado o agregado graúdo, no caso brita, o produto é chamado de concreto (BENTUR e MINDESS, 2007).

As fibras como instrumento de reforço de pastas e argamassas são geralmente aplicadas em finas camadas, com fibras vegetais e de vidro utilizadas geralmente em revestimentos, atuando com função primária e ocupando cerca de 5 a 15% em volume da mistura, os métodos de produção para a fabricação destes materiais compósitos devem ser especiais (BENTUR e MINDESS, 2007).

No concreto a volumetria das fibras aplicadas a mistura muda drasticamente, não ultrapassado 2% em volume, e tem atuação secundária no material principalmente para o controle de fissuração, e o primário é realizado pela armadura

de aço, e podem ser incorporadas de maneira mais simples e sem necessidades de aplicações tecnológicas específicas. Com aplicações mais sofisticadas avaliando a reologia e a microestrutura da mistura podem permitir a aplicação entre 2 a 6% de volume de fibras menores, apresentando um reforço e aprimoramento mais efetivos das propriedades do compósito (BENTUR e MINDESS, 2007).

2.5.2 Forma e Distribuição de Fibras

A utilização de fibras como instrumento de reforço é descrita na bíblia no livro de Êxodos 5, 6-7: E o faraó ordenou no mesmo dia os mestres das tarefas do povo, e seus oficias, dizendo: “Não debes mais dar ao povo palha para fazer tijolos, como até agora, deixa-os ir e juntar a palha para eles mesmos”. Na aplicação de palhas para construção de tijolos, como elemento reforçado.

O primeiro composto utilizado em larga escala foi o cimento amianto, também conhecido como fibrocimento, é um material de cimento Portland com adição de fibras de amianto, que dá ao produto alta resistência a tração e a compressão (BENTUR e MINDESS, 2007).

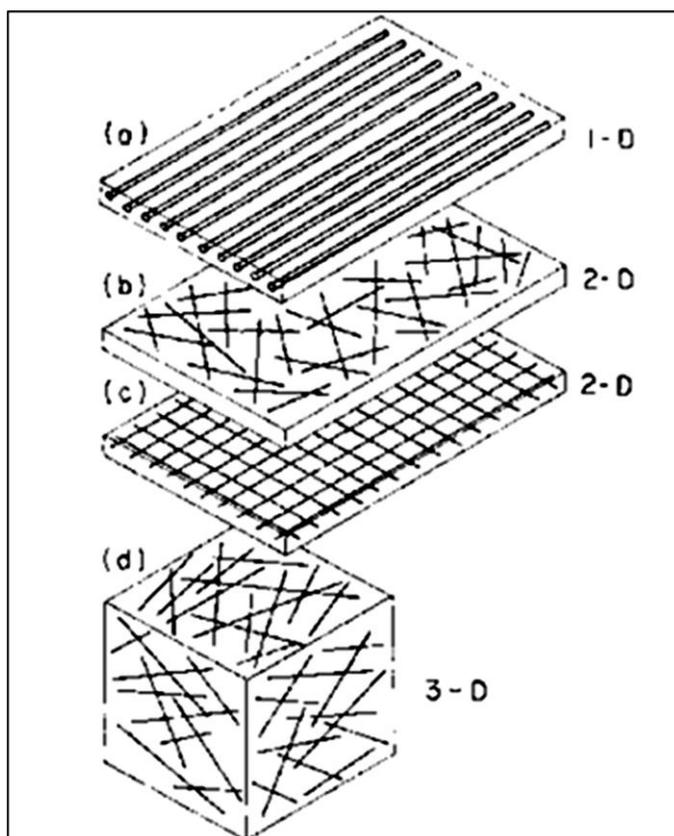
Segundo Bentur e Mindess (2007), a diversidade de fibras utilizadas como instrumento de reforço de matrizes de cimento tem origem metálica, natural, cerâmica e polimérica com diferentes propriedades mecânicas, físicas, químicas e com diferentes geometrias. As formas das fibras são divididas em dois grupos:

- Monofilamentos discretos separados uns dos outros;
- Conjuntos de fibras.

No caso do conjunto de fibras geralmente é constituído por feixes de filamentos, que determinam em várias configurações a interação da fibra com a matriz (BENTUR e MINDESS, 2007).

A Figura 21 demonstra os tipos de organização de fibras na matriz.

Figura 21 - Classificação do arranjo das fibras



Fonte: Bentur e Mindess (2007, p.14)

2.5.3 Interface Matriz-Fibra

Os compósitos de cimento são caracterizados por uma zona de transição de interface (ITZ), dependente do tipo de fibra e da tecnologia de produção, que em alguns casos podem mudar consideravelmente com o tempo. A microestrutura da ITZ está intimamente ligada com a natureza da matriz, com as partículas do cimento variando de 1 a 100 μ m de diâmetro e média de 10 μ m na mistura fresca, a reação de hidratação do cimento forma as partículas que exercem influência tanto pela presença de água ao redor do instrumento de reforço, no caso a fibra, quanto a ineficiência na cobertura das partículas de cimento ao redor da fibra, resultando em uma má aderência com o elemento (BENTUR e MINDESS, 2007).

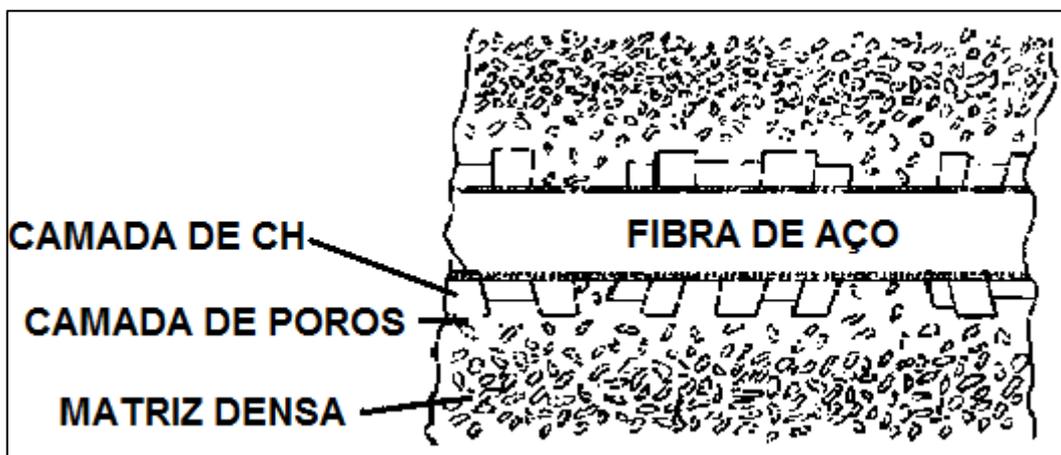
Por apresentar grande cadeia polimérica e a permeabilidade estar ligada ao peso molecular do elemento, o politereftalato de etileno, torna-se um poliéster altamente impermeável, dificultando a adesão de alguma matriz ao polímero extraído de garrafas gaseificadas, onde a superfície é extremamente lisa e estanque.

Zonas de transição podem ser quase completamente eliminadas, resultado de uma ligação elevada com a matriz, no caso da aplicação de tensões em misturas no estado fresco a ITZ é mais densa e menor. Outro fator que gera influência é a forma de dispersão, obtendo melhor empacotamento da fibra, que pode ser modificada pela presença de processos associados de tratamentos superficiais, como a abrasão da fibra para uma ligação microestrutural maior do elemento (BENTUR e MINDESS, 2007).

2.5.4 Arrancamento

No ensaio de arrancamento da fibra imersa na matriz, a zona de interface em que ocorre esse desprendimento segundo Peled e Bentur (1998), mede de 40 a 70 μm , por uma força de cisalhamento na parte mais frágil denominada camada de poros, localizada entre a matriz densa e a camada de hidróxido de cálcio, o qual envolve a fibra, e tem uma dimensão de 10 a 40 μm a partir da fibra. A Figura 22 ilustra a zona de interface do material compósito.

Figura 22 - Zona de interface de um compósito reforçado com fibra de aço



Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007, p.22)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os procedimentos e etapas para a caracterização dos materiais utilizados e dos ensaios laboratoriais realizados, como também o procedimento para a elaboração da fibra para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Caracterização dos Materiais

3.1.1 Agregado Mineral

O agregado utilizado foi fornecido pela Britagem Pedra Rosada localizada na cidade de Alegrete, e estavam dispostos no depósito do Laboratório de Engenharia Civil na Unipampa – Campus Alegrete.

A caracterização do agregado miúdo, neste caso a areia, foi realizada de acordo com a ABNT NBR NM 248 (Agregados – Determinação da composição granulométrica), e da norma ABNT NBR NM 45 (Agregado – Determinação da massa unitária e do volume de vazios).

Como já referido a determinação da curva granulométrica do agregado miúdo foi realizada com base na NBR NM 248:2001, que descreve o método de determinação da composição de agregados. Foi empregada a série normal de peneiras: 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 600 μ m; 300 μ m; 150 μ m; e fundo; que foi pesado na balança como prescrito no item 4 desta norma, como precisão de 0,1% da massa da amostra de ensaio, ou seja, 0,5g.

Todo material ensaiado foi seco em estufa com temperatura de 105°C durante um período de vinte e quatro horas, para posterior realização do ensaio granulométrico.

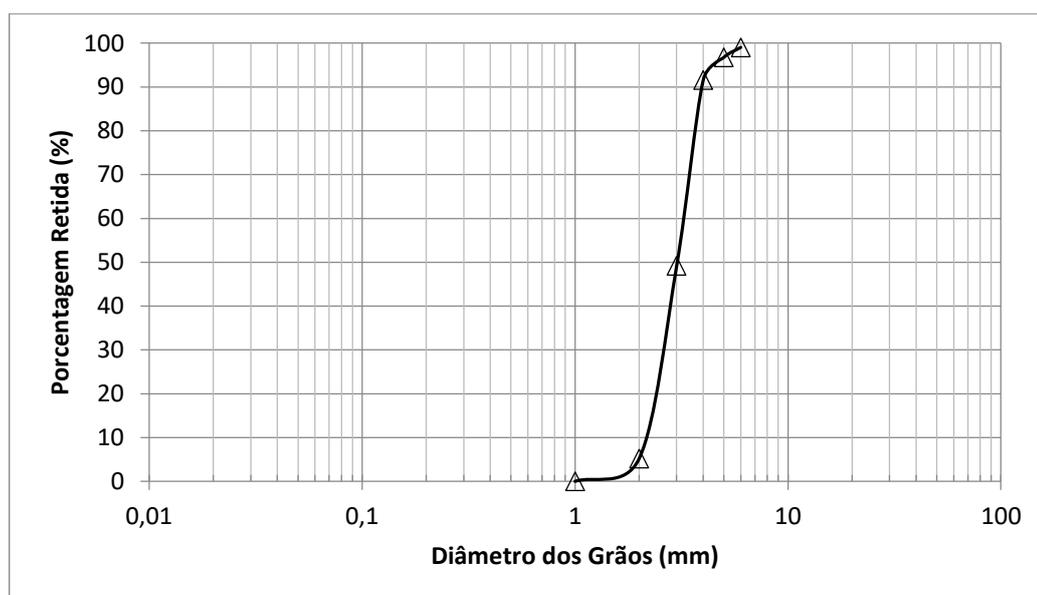
A Tabela 4 exprime os dados obtidos nos ensaios granulométricos, exemplificados como ensaio 1 e ensaio 2, com sua posterior média aritmética e porcentagens retidas em cada peneira, retida acumulada e porcentagem passante. A curva obtida está expressa na Figura 23.

Tabela 4 - Ensaio de granulometria da areia

| AREIA (Granulometria) | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-------------|-------------------|---------------|
| PENEIRAS (mm) | ENSAIO 1 (g) | ENSAIO 2 (g) | ENSAIO MÉDIA (g) | % RETIDA | % RETIDA ACUM. | % PASSANTE |
| 4,75 | 0,4 | 1,6 | 1 | 0,201 | 0,201 | 99,799 |
| 2,36 | 4,2 | 3,4 | 3,8 | 0,762 | 0,962 | 99,038 |
| 1,18 | 11,2 | 11,5 | 11,35 | 2,276 | 3,238 | 96,762 |
| 0,6 | 25,8 | 26 | 25,9 | 5,193 | 8,431 | 91,569 |
| 0,3 | 210 | 212,8 | 211,4 | 42,386 | 50,817 | 49,183 |
| 0,15 | 219,8 | 219 | 219,4 | 43,990 | 94,807 | 5,193 |
| <0,15 | 27,1 | 24,7 | 25,9 | 5,193 | 100,000 | 0,000 |
| Σ | 498,5 | 499 | 498,75 | 100 | | |

Fonte: Acervo próprio

Figura 23 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Acervo próprio

A massa específica do agregado miúdo é a relação entre a massa seca e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Para a realização deste ensaio é necessário que a quantidade de material seja no mínimo duas vezes maior que o recipiente utilizado, que foi preenchido de areia com uma concha a uma altura de 10 a 12cm do topo do recipiente, a superfície final foi regularizada com uma régua metálica. A pesagem do recipiente com material nele contido é realizado na balança, que está com a tara apenas do recipiente, resultando apenas na massa unitária do agregado

que é a média das massas. O valor da massa unitária do agregado miúdo está descrito na Tabela 5, e resultou em um valor de 2,626g/cm³ em média.

Tabela 5 - Massa específica e módulo de finura da areia

| AREIA (g/cm ³) – Massa específica | |
|---|-------|
| 1 | 2,622 |
| 2 | 2,632 |
| Média | 2,626 |

Fonte: Acervo próprio

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP-IV-32, Portland pozolânico, com massa específica obtida por meio da norma ABNT NBR NM 23:2001 de 2,7 g/cm³. Este cimento tem adição de pozolana no teor de 15% a 50% em massa regulamentada pela norma brasileira ABNT NBR 5736 – Cimento Portland Pozolânico.

Estes dados, juntamente com os obtidos pelos ensaios de agregado miúdo foram utilizados para o cálculo do traço na argamassa, que estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Traço da argamassa

| TRAÇO - Argamassa | |
|-------------------|------|
| CIMENTO | 1 |
| AREIA | 2,67 |
| A/C | 0,5 |

Fonte: Acervo próprio

3.1.3 Fibra

As fibras de politereftalto de etileno foram produzidas a partir de garrafas PET recolhidas em local de descarte localizado na Av. Ibicuí, em Alegrete.

O processo de produção iniciou-se com a higienização da garrafa (Figura 24), retirada da tampa e do rótulo, a lavagem foi realizada com detergente neutro sob água

corrente, verificando a presença de sujeiras, ocorrendo a repetição do processo caso necessário, pois estas garrafas muitas vezes acabam com resquícios de óleo de cozinha e outros tipos de materiais oleaginosos para os quais serviram de recipiente. Este processo é de extrema importância devido as reações que podem ser geradas na matriz, caso sejam adicionados óleos ocorre a diminuição na viscosidade e falta de adesão na interface de ligação entre a fibra e a matriz.

Figura 24 - Processo de higienização da garrafa



Fonte: Elaboração Própria

Após a lavagem, há a necessidade de retirada do fundo da garrafa, que neste processo de produção não foi utilizado, o fundo foi definido como a parte inferior da linha presente em todas as garrafas conforme a Figura 25.

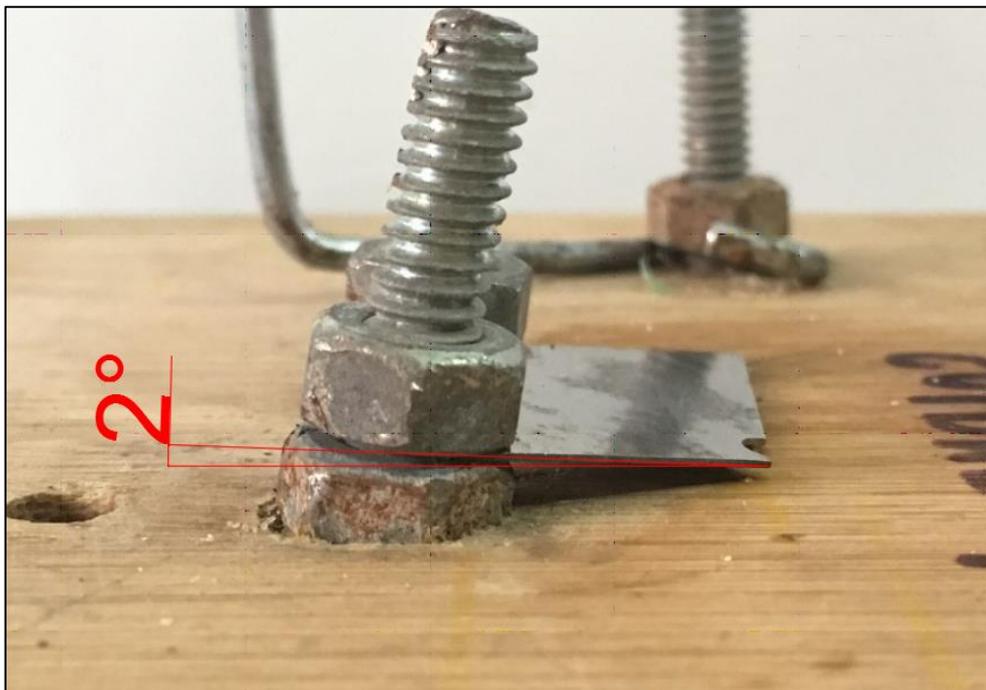
Figura 25 - Linha de corte para a retirada do fundo



Fonte: Elaboração Própria

O processo de corte da garrafa foi executado por uma lâmina de estilete com um pequeno ângulo em relação a base (Figura 26) , o que define a espessura final do filete de PET, tal ângulo com a base de corte foi necessário para que haja a continuidade de corte, caso seja insuficiente inicia-se o corte, porém no decorrer há uma variação (diminuição de espessura) e posterior falha no filete, que pode ser ocasionada também se não for realizada a troca da lâmina periodicamente, resultado da grande resistência ao corte que a garrafa emprega na lâmina. A lâmina de estilete não foi empregada em seu comprimento total, foi realizada a quebra da mesma para fixação na base e o restante foi utilizado posteriormente no mesmo processo.

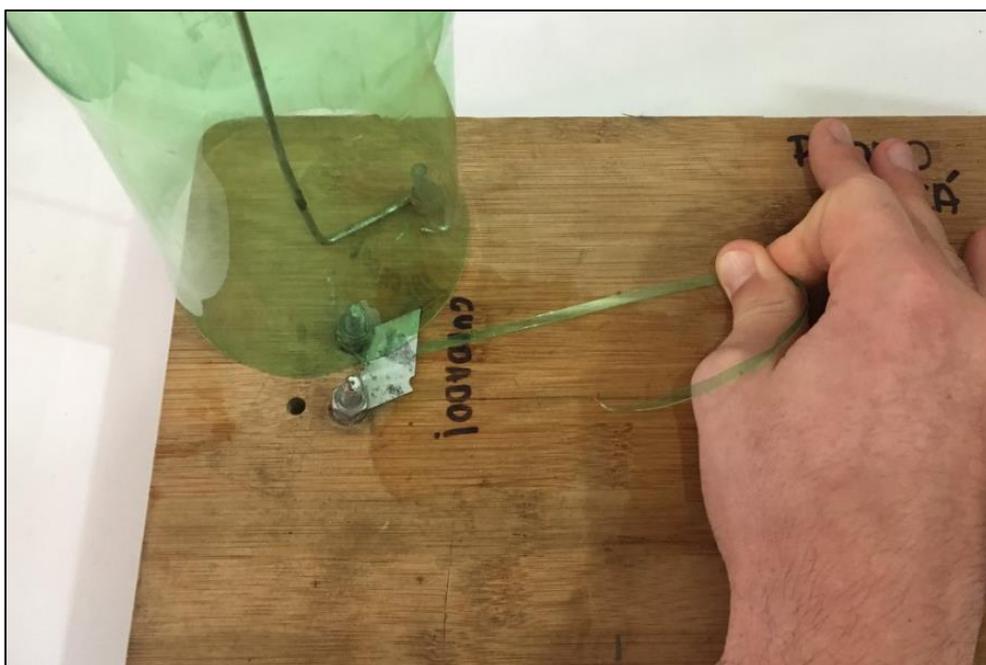
Figura 26 - Ângulo da lâmina com a base de corte



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 27 demonstra a formação do filete a partir da garrafa já higienizada.

Figura 27 - Formação do filete a partir da garrafa



Fonte: Elaboração Própria

apresente uma espessura igual a distância é possível realizar uma aproximação das engrenagens manualmente e realizar um tratamento adequado.

Figura 29 - Engrenagens utilizadas para tratamento mecânico



Fonte: Elaboração Própria

A partir do filete já conformado é possível realizar o corte a cada 5cm que resultará em uma fibra com dimensões finais de 5mm de largura; 0,25mm de espessura; e 50mm de comprimento. O resultado final da fibra é mostrado na Figura 30.

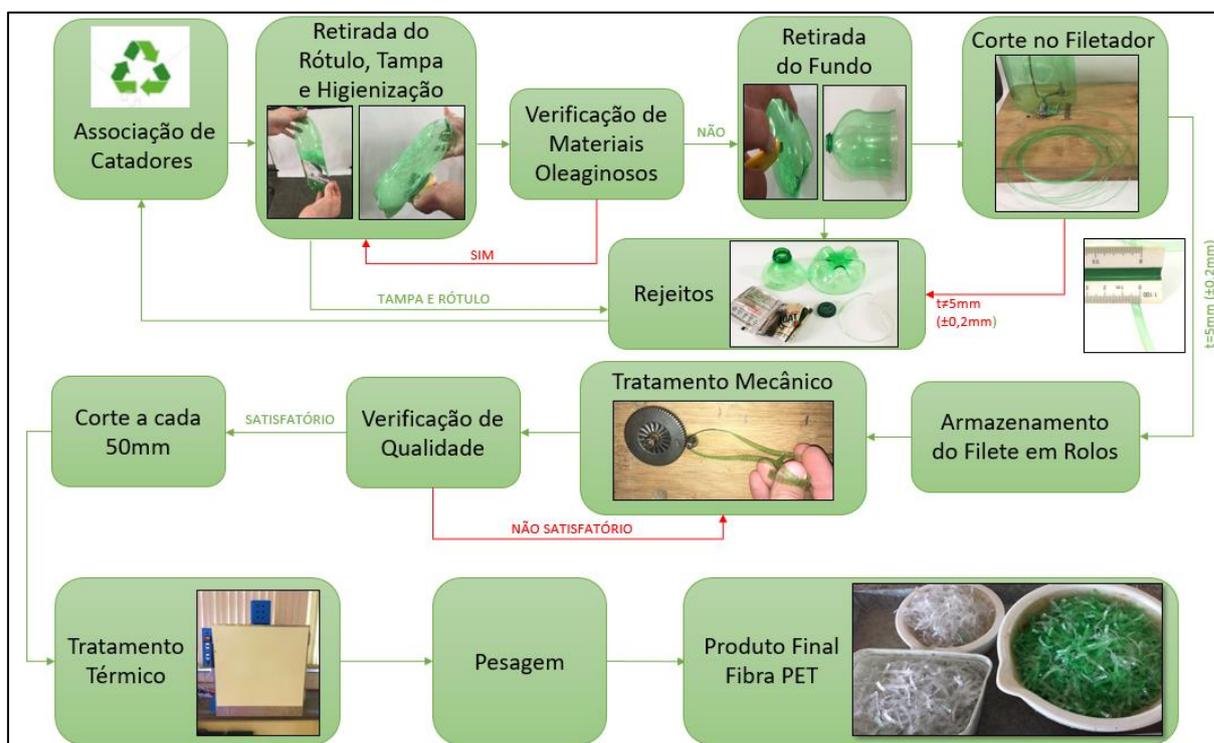
Figura 30 - Fibras de politereftalato de etileno com tratamento mecânico



Fonte: Elaboração Própria

Todo processo de produção foi organizado no fluxograma da Figura 31.

Figura 31 - Fluxograma de produção da fibra de PET



Fonte: Elaboração Própria

3.2 Tratamento térmico

O politereftalato de etileno tem ponto de fusão entre 250 a 260°C de acordo com a base de dados do IFA, Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance, no entanto é fundamental a verificação de aumento de cristalização e de alteração na forma da fibra, visual ou não nos corpos de prova, que justifique diferenças no ensaio.

O tratamento térmico foi realizado em estufa (Figura 32), onde o corpo de prova permaneceu por um período de 60 minutos com temperatura constante, a primeira temperatura foi de 40°C com aumento progressivo de 20°C, e a última temperatura 180°C. A estufa foi programada para ao atingir cada temperatura de ensaio realizar o auto desligamento após os 60 minutos.

Figura 32 - Estufa utilizada para a realização do tratamento térmico



Fonte: Acervo Próprio

As temperaturas de ensaio foram determinadas com base na possibilidade da utilização das fibras em misturas onde a temperatura não é ambiente, como misturas asfálticas. Como já salientado por Marinho (2005), o PET possui ótimas propriedades em temperaturas de até 175°C em uso não contínuo, e segundo Rabello e Wellen tem temperatura de transição vítrea de aproximadamente de 71°C e temperatura de cristalização a frio de aproximadamente 120°C.

Este tratamento térmico foi realizado para posterior ensaio de tração na fibra, para verificar a diferença entre a resistência à tração e comportamento de deformação para as diferentes temperaturas.

As amostras têm as dimensões expressas para termoplásticos da norma ASTM D638, e foram dispostas em uma fôrma para a colocação na estufa (Figura 33), com temperatura já estabilizada de ensaio. Foram identificadas em um lado da amostra a temperatura de ensaio e do outro lado do halter o número da amostra.

Após o tempo de ensaio as amostras foram retiradas e resfriadas em temperatura ambiente (25°C).

Figura 33 - Disposição das amostras para colocação na estufa



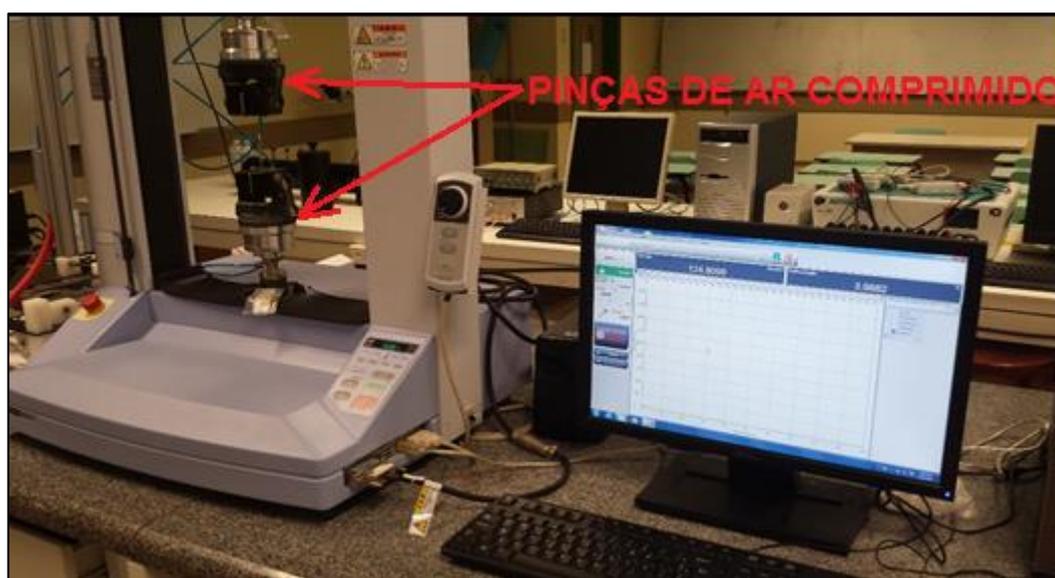
Fonte: Acervo Próprio

É necessário salientar que foram obtidas das amostras medidas de espessura, largura e comprimento antes da colocação na estufa e após o término do ensaio, para a verificação da diminuição da amostra após o aquecimento, com o intuito de determinar as áreas para o ensaio de tração.

3.3 Ensaio de tração direta

O ensaio de tração na fibra para determinação da resistência à tração foi realizado na máquina de ensaios mecânicos SHIMADZU AGX-5KN (Figura 34), pela sua precisão de dados, de onde são obtidos os dados de carga aplicada ao material e deslocamento do travessão até o momento de ruptura.

Figura 34 - Ensaio de resistência à tração da fibra



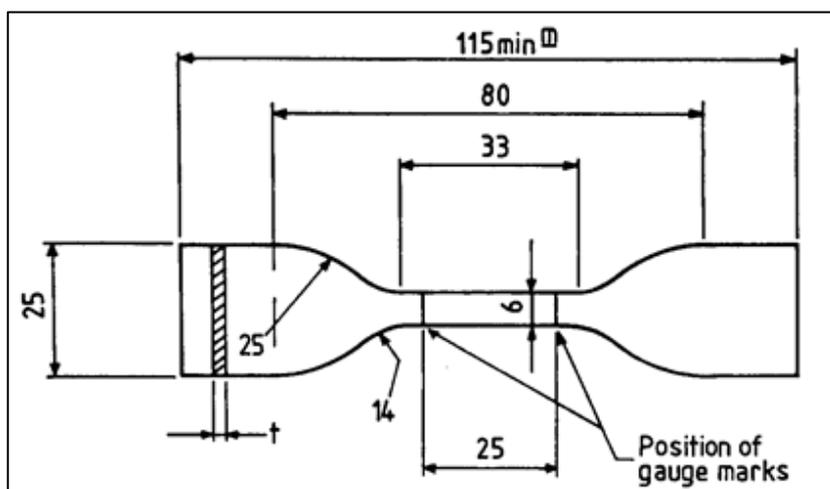
Fonte: Elaboração Própria

A norma empregada foi a ASTM D638 – Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, que define a determinação de tensão de plásticos reforçados e não-reforçados com formato de halteres padrão com condições de tratamento, temperatura, umidade e velocidade do travessão da prensa para cada tipo de plástico específico.

A norma exige a classificação do plástico em relação a rigidez para determinar as dimensões da amostra (halter), como o PET é um termoplástico, classificado pela norma como tipo IV, tem as dimensões de acordo com a Figura 35. A velocidade de

deslocamento do travessão foi de 1 mm/min com garras de ar comprimido com pressão de 75 psi para melhor adesão e com o intuito de evitar o escorregamento da fibra no decorrer do ensaio.

Figura 35 - Amostra no formato de halter para ensaio de tração em termoplásticos



Fonte: Figura 8.3 – Tensile test piece ISO/DIS 527.

Para a confecção das amostras em forma de halter foi necessária a fabricação de um molde de MDF cortado em impressora a laser (Figura 36), para a precisão de dimensões e para que no corte da amostra não houvesse pontos de acúmulos de tensão, como foram verificados nas amostras cortadas sem molde.

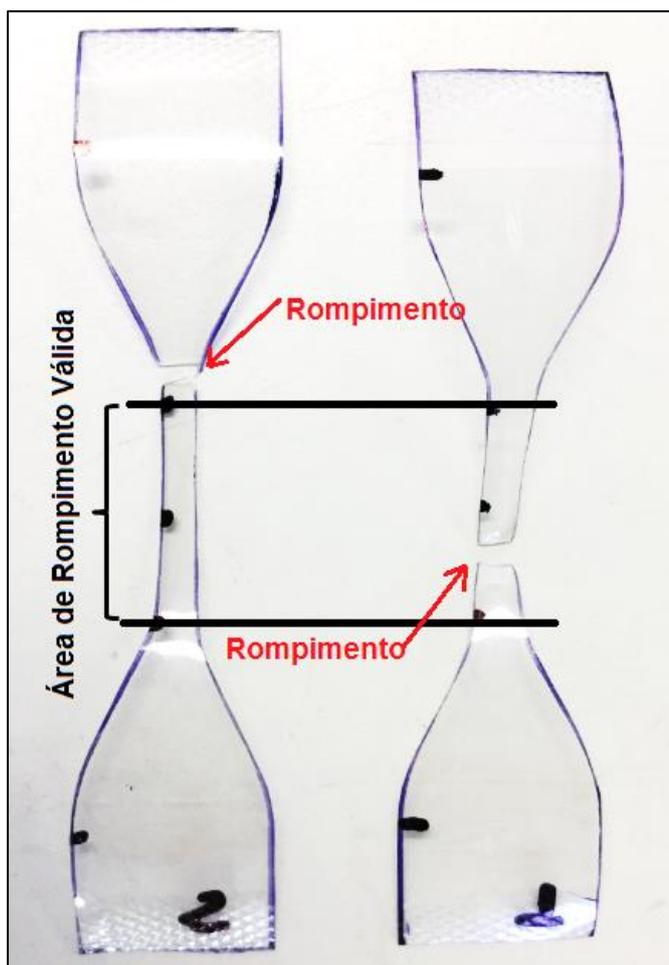
Figura 36 - Moldes em MDF cortados a laser



Fonte: Acervo Próprio

Outro fator a ser considerado é o posicionamento do rompimento, para que seja considerado válido há a necessidade que esteja posicionado dentro da zona central da peça, com comprimento de 25mm, portanto para todas as amostras ensaiadas houve a necessidade de verificar a zona em que ocorreu o rompimento. Na Figura 37 a amostra 2 (esquerda) apresenta rompimento não válido para o ensaio de resistência à tração, enquanto a amostra 1 (direita) apresenta rompimento válido.

Figura 37 - Pontos de rompimento das amostras



Fonte: Elaboração Própria

3.3.1 Ensaio de arrancamento (PULLOUT)

O ensaio de arrancamento teve o intuito de verificar a influência da modificação com o tratamento mecânico superficial na fibra, com melhoramento na interface

matriz-fibra (ITZ). Esta quantificação é resultante da força necessária para deslocar no sentido da força a fibra imersa da matriz.

A realização deste ensaio foi desenvolvida também na prensa SHIMADZU AGX-5KN com velocidade de deslocamento de 1mm/min do travessão. O corpo de prova que constitui a matriz de ensaio tem formato cilíndrico com as seguintes dimensões: 25mm de altura e 100mm de diâmetro, esse corpo de prova foi moldado com o traço referente a Tabela 6, que recebeu a fibra imersa em todo seu comprimento, portanto 25mm de embebimento. O comprimento externo da fibra fora da matriz até a garra tem o comprimento de 35mm, totalizando um comprimento total de fibra de 60mm.

O ensaio de PULLOUT foi realizado com idade de três e sete dias, com o intuito de verificar o aumento de resistência com o tempo de hidratação da argamassa, portanto foi dividido em fibras com tratamento mecânico superficial e a fibra sem tratamento, lisa.

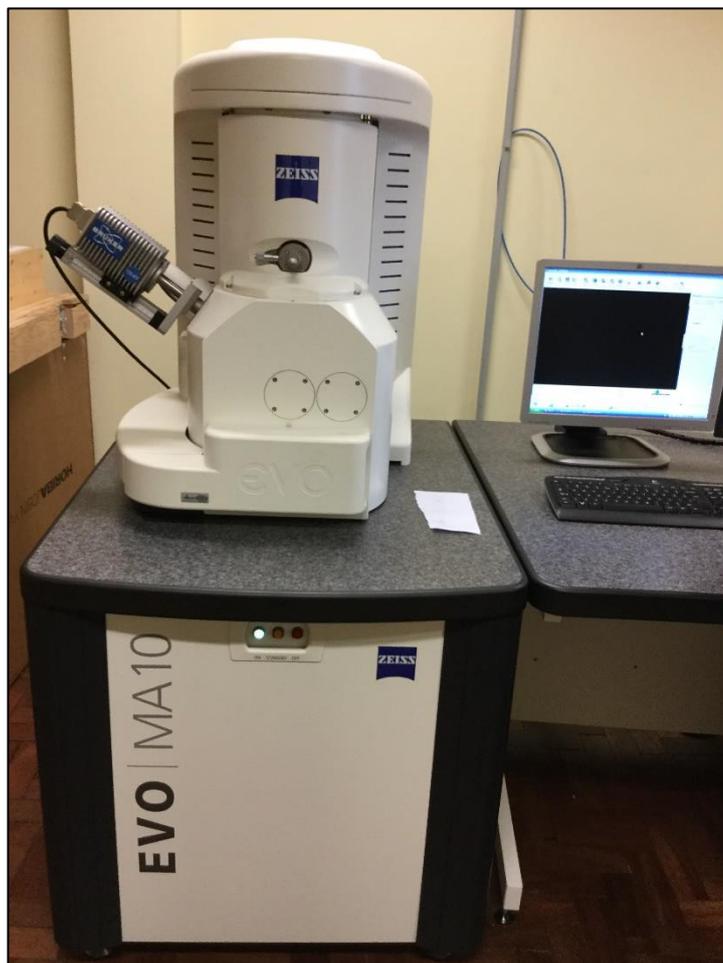
O aparato para realização do ensaio foi desenvolvido com auxílio do professor Aldoni Gabriel Wiedenhof na usinagem das placas circulares, e dimensionado pelo professor Wang Chong e pelo autor, para perfeito encaixe na base da prensa e devido posicionamento da amostra..

3.3.2 Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura, MEV, tem por finalidade verificar modificações superficiais de borda que ocorreram com o aumento da temperatura nas amostras.

O MEV utilizado é da marca ZEISS, com modelo EVO MA10 (Figura 38), que faz a leitura por emissão de elétrons através da metalização da amostra, esta metalização foi realizada no laboratório da Unipampa, onde foi colocada uma camada de átomos de ouro (Au) na superfície da amostra.

Figura 38 - Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Acervo Próprio

O equipamento para metalização foi o HHV Scancoat SIX mostrado na Figura 39.

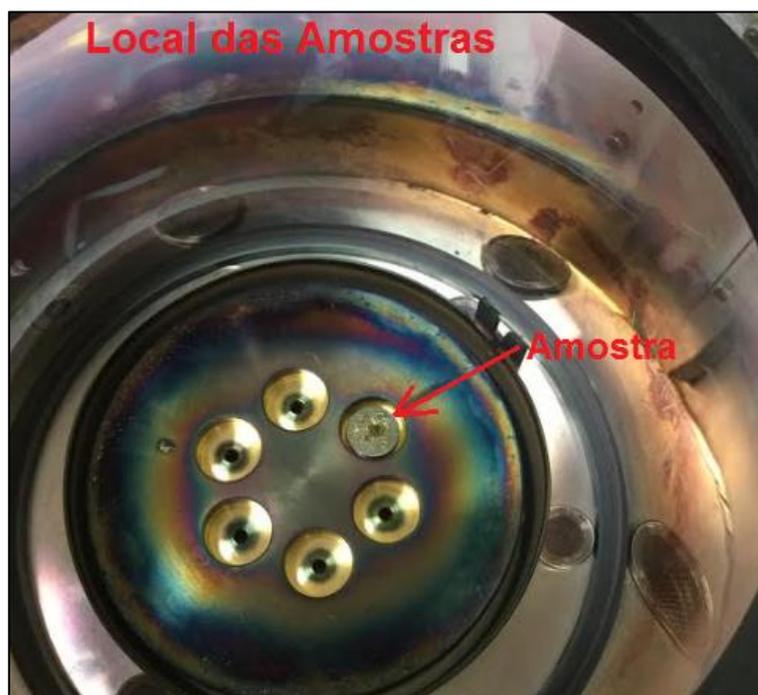
Figura 39. Equipamento de metalização



Fonte: Acervo Próprio

A Figura 40 demonstra uma amostra já metalizada dentro do equipamento de metalização.

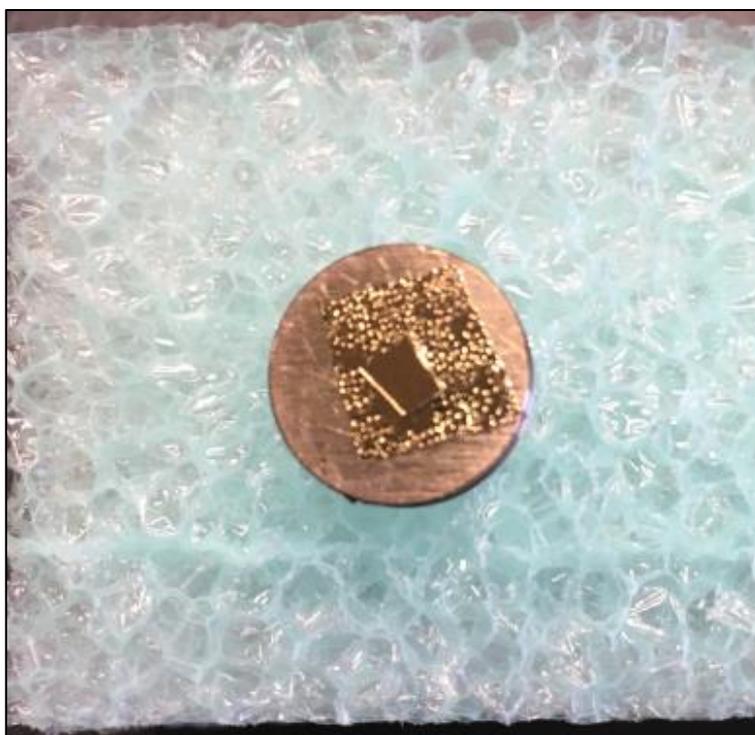
Figura 40. Amostra dentro do equipamento de metalização



Fonte: Acervo Próprio

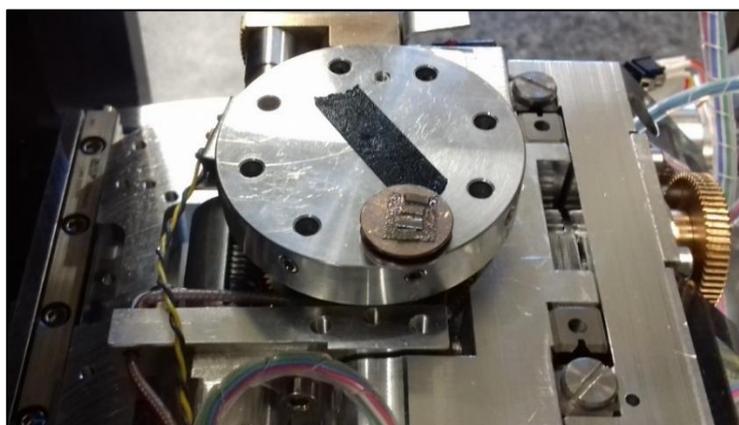
Como todas amostras foram de materiais não metálicos, foi necessário realizar a metalização de seis a oito vezes para que a imagem resultante do MEV tivesse resolução satisfatória com as ampliações de 200x, 500x e 1000x em uma voltagem de 20 kvolts. Foram realizadas tentativas de voltagens menores como de 5 kvolts, porém a resolução se mostrou insatisfatória. A Figura 41 demonstra a amostra metalizada oito vezes e a posterior colocação dentro do MEV na Figura 42.

Figura 41 - Amostra metalizada oito vezes



Fonte: Acervo Próprio

Figura 42 - Amostra no interior do MEV para realização de imagens.



Fonte: Acervo Próprio

Nas amostras de cada temperatura foram aplicadas fotos de borda, verificando se a temperatura que as mesmas foram aplicadas tornaram as áreas de corte das amostras uma zona de maior homogeneidade, gerada por uma “soldagem” térmica nesta área, reduzindo pontos de fragilidade que possam acarretar o rompimento da amostra.

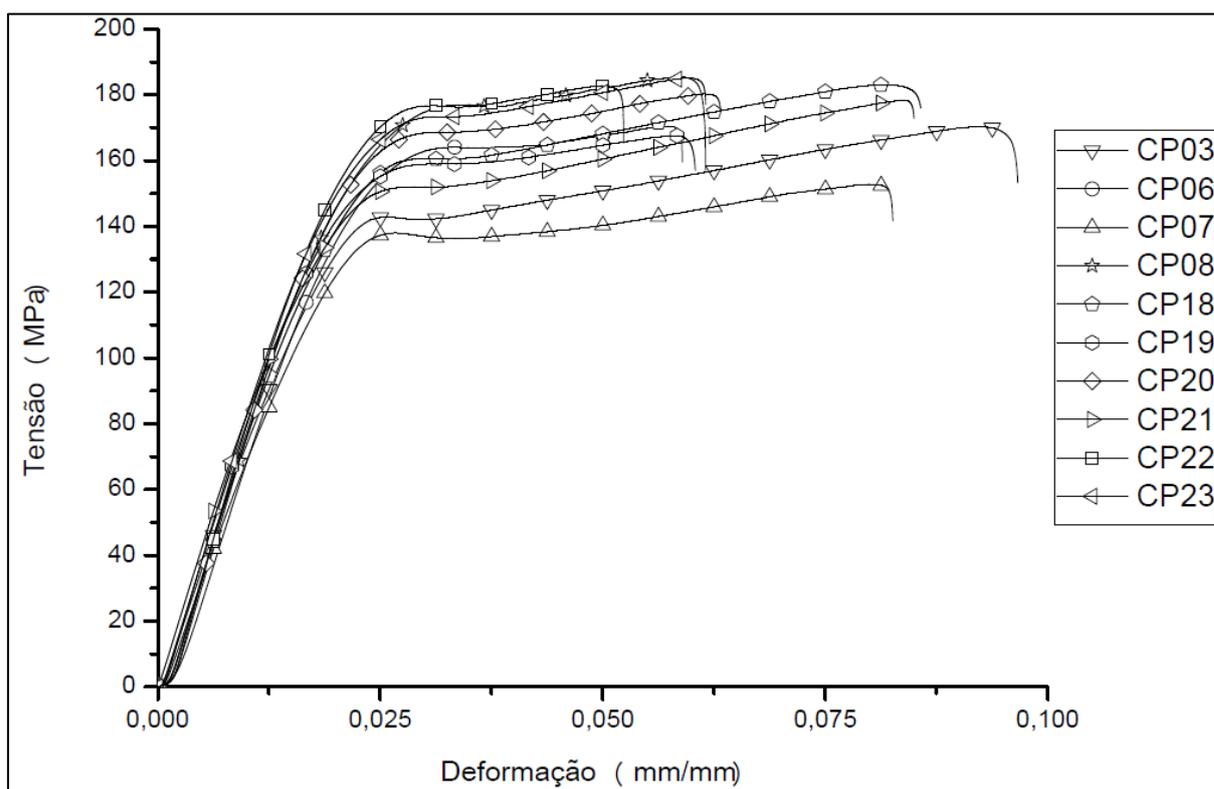
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Tração direta das fibras em temperatura ambiente

Os ensaios de tração foram realizados com dois grupos de amostras com cores diferentes em temperatura ambiente (25°C), a cor verde, em que a garrafa sofre pigmentação com corante, e a garrafa transparente, na qual não há presença de corante. Com o intuito de verificar se a presença de tal substância, responsável pela coloração, altera alguma propriedade mecânica no PETG.

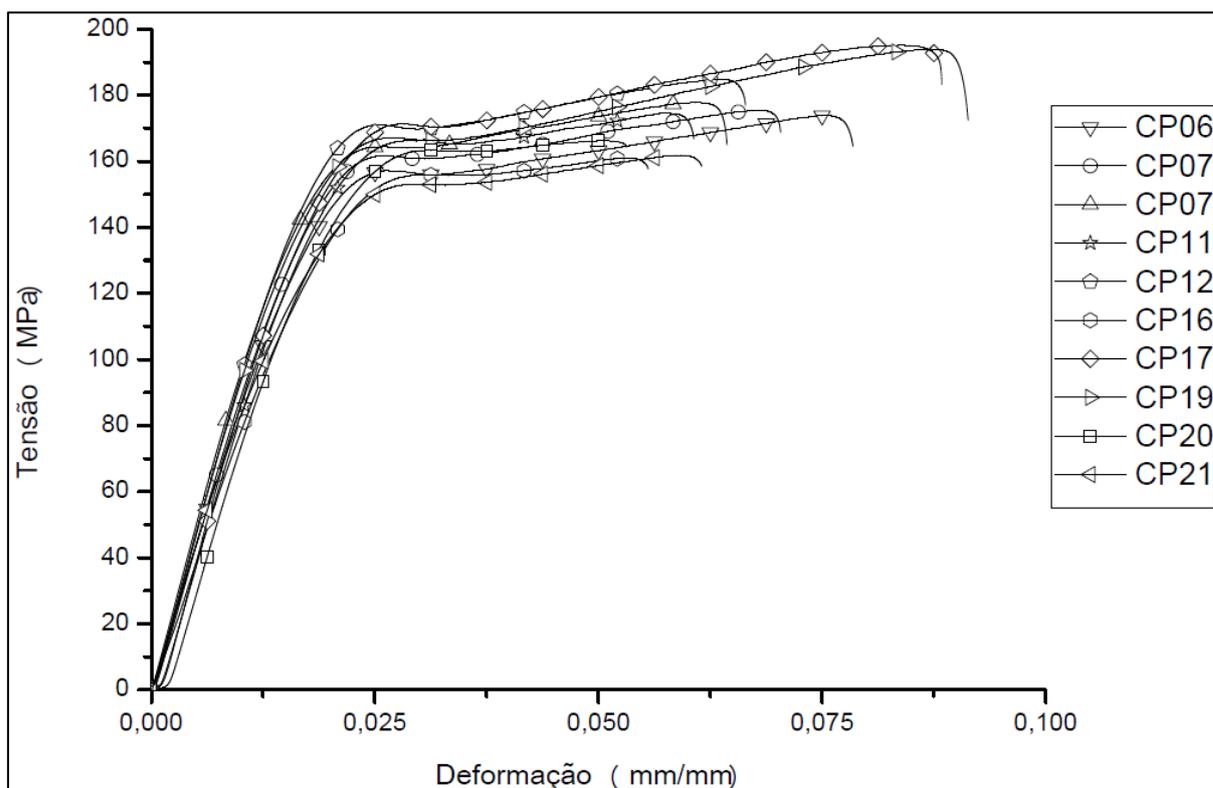
As curvas de tensão x deformação para cada grupo de amostra, correspondente a dez corpos de provas de cada cor, estão presentes na Figura 43 e Figura 44, para cor transparente e verde respectivamente.

Figura 43 - Curvas tensão x deformação das amostras de PET transparente



Fonte: Acervo Próprio

Figura 44 - Curvas tensão x deformação das amostras de PET verde



Fonte: Acervo Próprio

Para cada curva tensão x deformação foram determinados valores médios de força, deslocamento, tensão e deformação, que estão apresentados nas Tabelas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação das fibras transparentes

| TRANSPARENTE | | | | |
|-----------------------|----------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Fmáx (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 254,4617 | 5,6635 | 0,06533 | 173,2853 |
| Desvio Padrão | 15,5329 | 1,2067 | 0,01455 | 13,7039 |
| Coef. de Variação (%) | 6,10 | 21,30 | 22,28 | 7,90 |

Fonte: Acervo Próprio

Tabela 8 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação das fibras verdes

| VERDE | | | | |
|-----------------------|----------------------|-------------------|--------------------|--------------|
| | F _{máx} (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 243,4342 | 5,5216 | 0,0690 | 176,4518 |
| Desvio Padrão | 30,2698 | 1,0502 | 0,0131 | 12,0008 |
| Coef. de Variação (%) | 12,43 | 19,02 | 19,02 | 6,80 |

Fonte: Acervo Próprio

Considerando os valores médios de cada cor foi possível verificar bastante proximidade de dados, e semelhança de curvas das amostras. A resistência à tração diferenciou-se em apenas 1,79%, com resistência final de 173,28 MPa para amostras transparentes e 176,45 MPa para as verdes, semelhante a deformação que se distingue em 5,33% nas deformações das amostras.

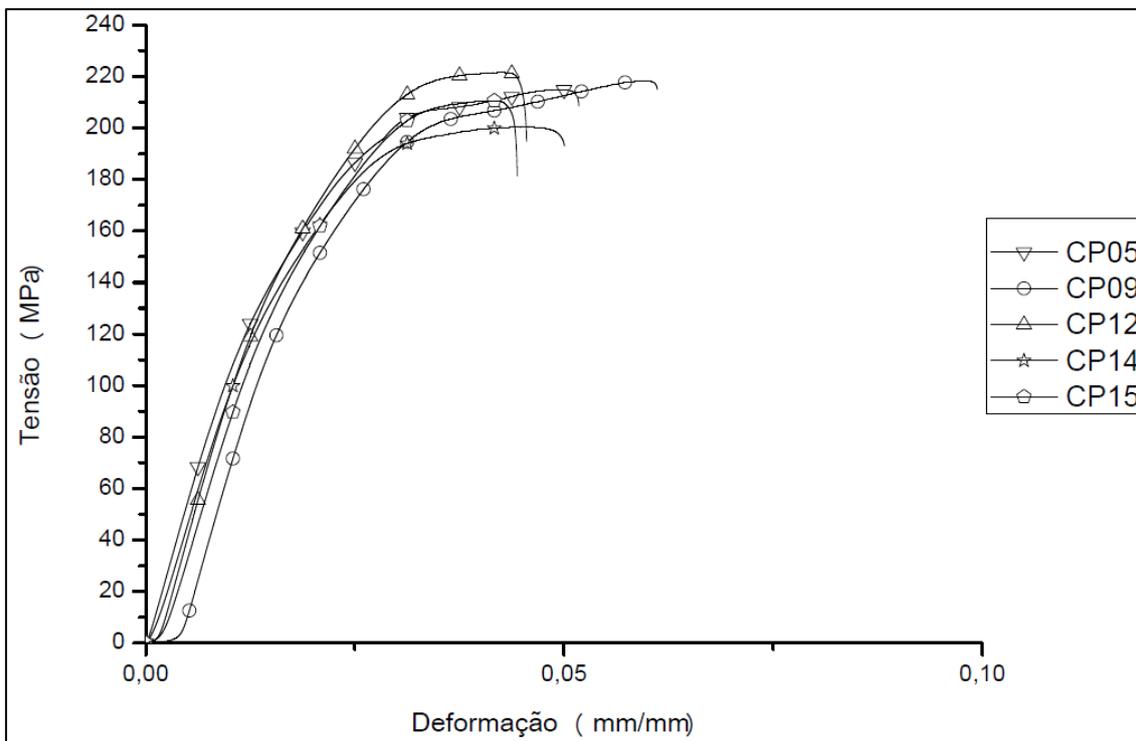
A presença de corante na garrafa não tornou diferente o comportamento das amostras ensaiadas, com resultados muito aproximados, tornando a separação por cor no emprego deste material em solicitações a tração não necessário no estudo dessa pesquisa.

4.2 Tração direta das fibras em diferentes temperaturas

A verificação da funcionalidade das fibras em misturas em que as temperaturas sejam maiores que a temperatura ambiente, tornou-se necessário, como já salientado, portanto foram traçadas curvas de tensão x deformação para as temperaturas de 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 graus Celsius, de amostras com rompimento considerado válido, dentro da área de rompimento.

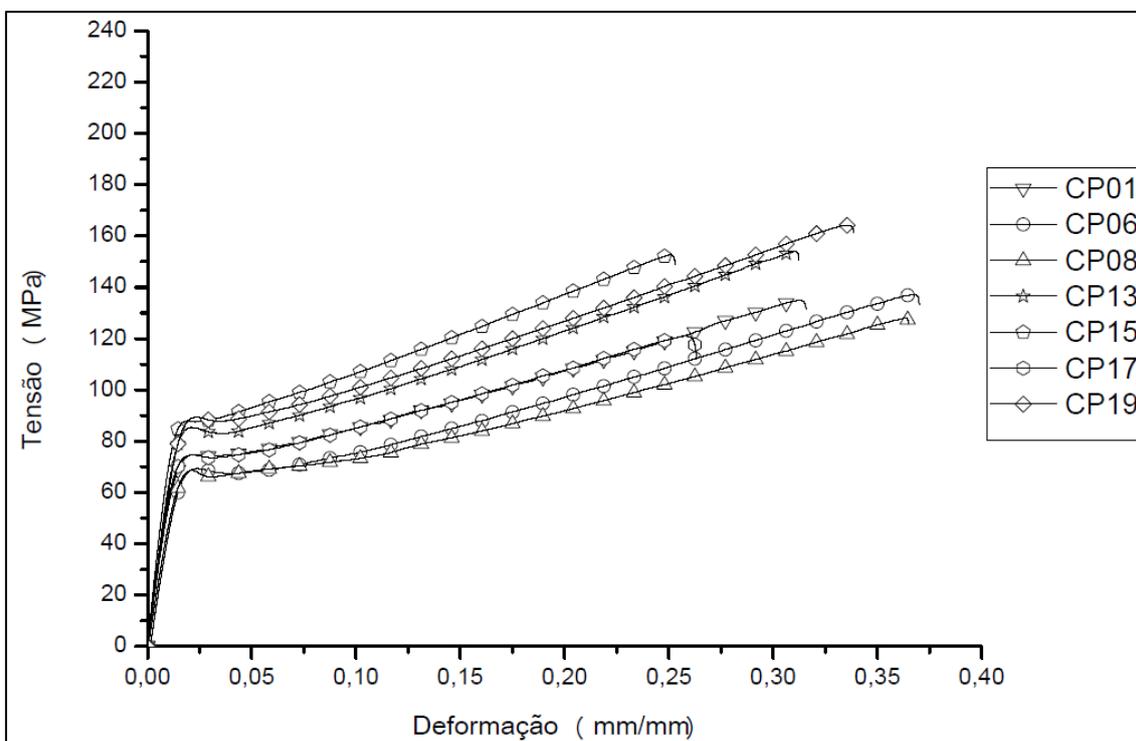
As Figuras Figura 45 a Figura 52 mostram as curvas de tensão x deformação, com um total de 5 a 6 amostras para cada temperatura.

Figura 45 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 40 °C



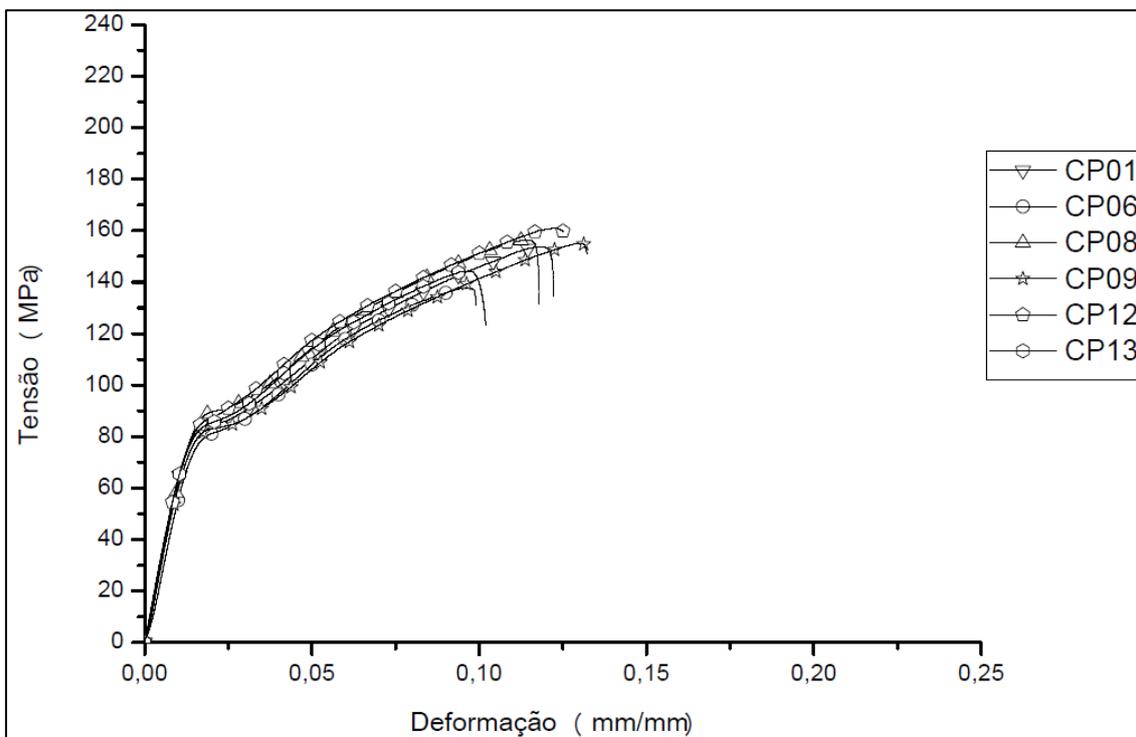
Fonte: Elaboração própria

Figura 46 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 60 °C



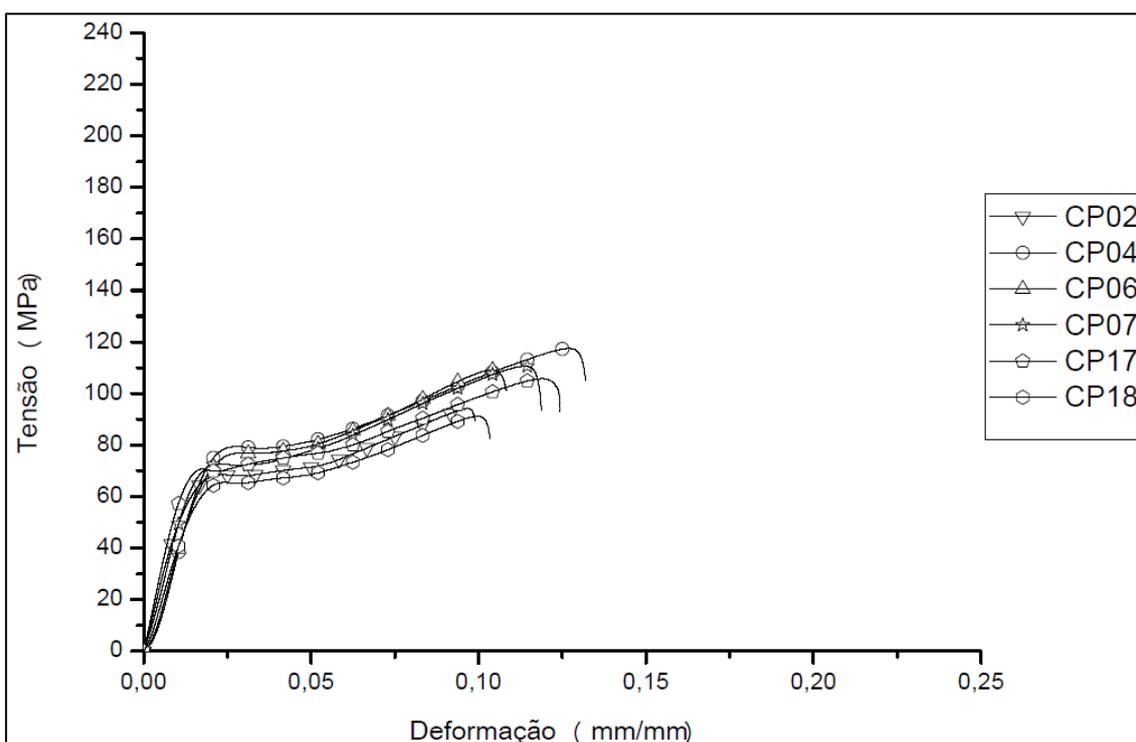
Fonte: Elaboração própria

Figura 47 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 80 °C



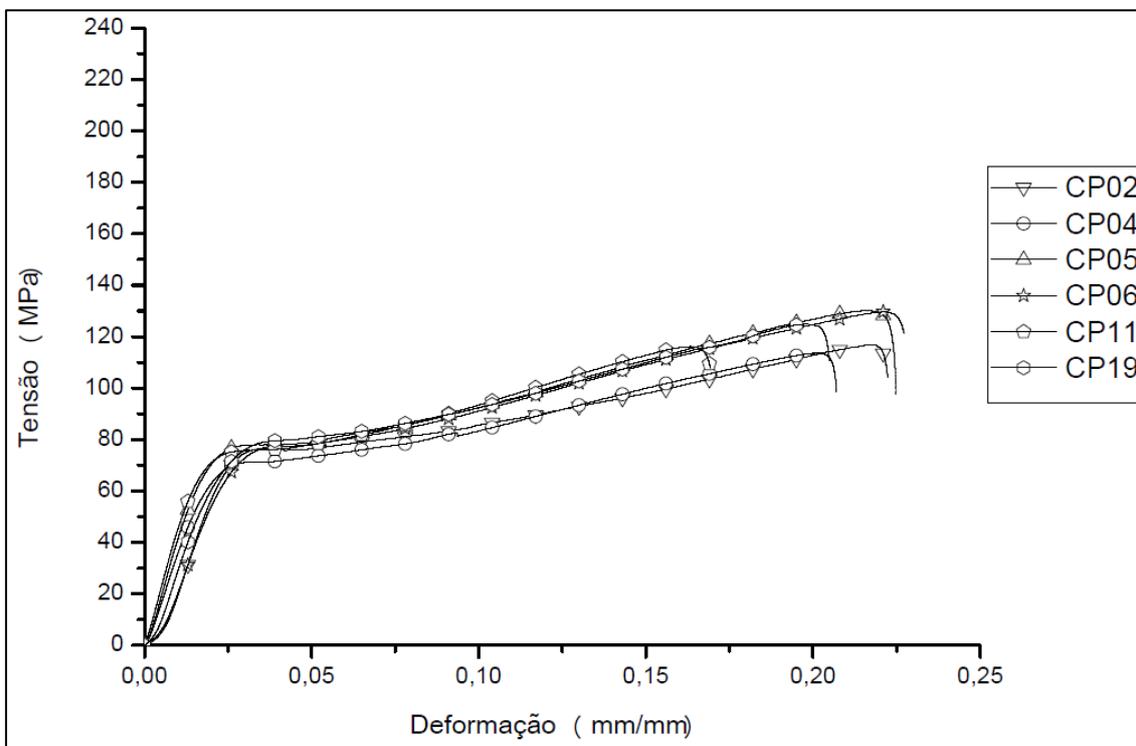
Fonte: Elaboração própria

Figura 48 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 100 °C



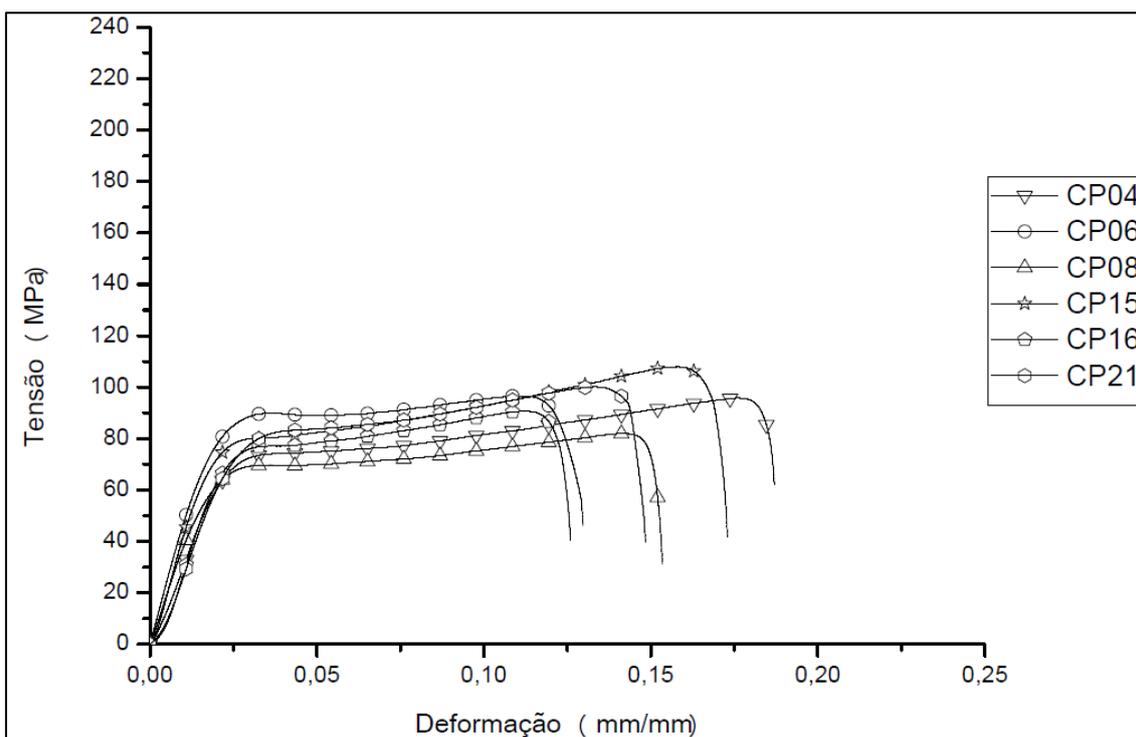
Fonte: Elaboração própria

Figura 49 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 120 °C



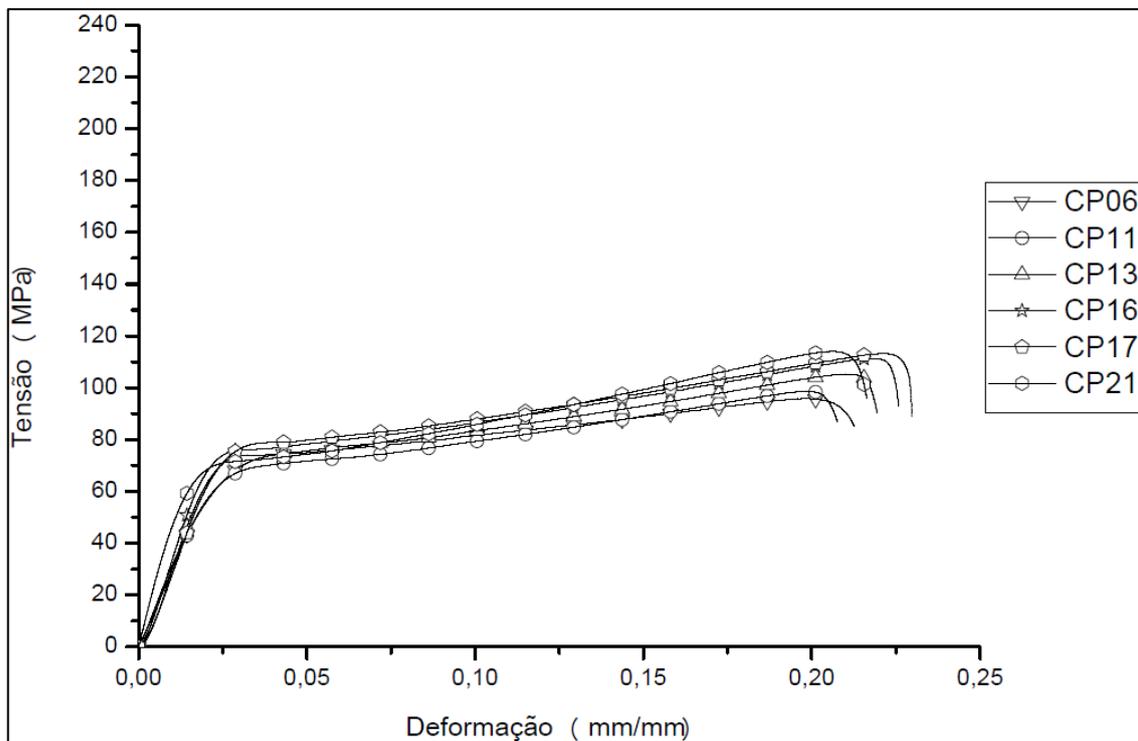
Fonte: Elaboração própria

Figura 50 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 140 °C



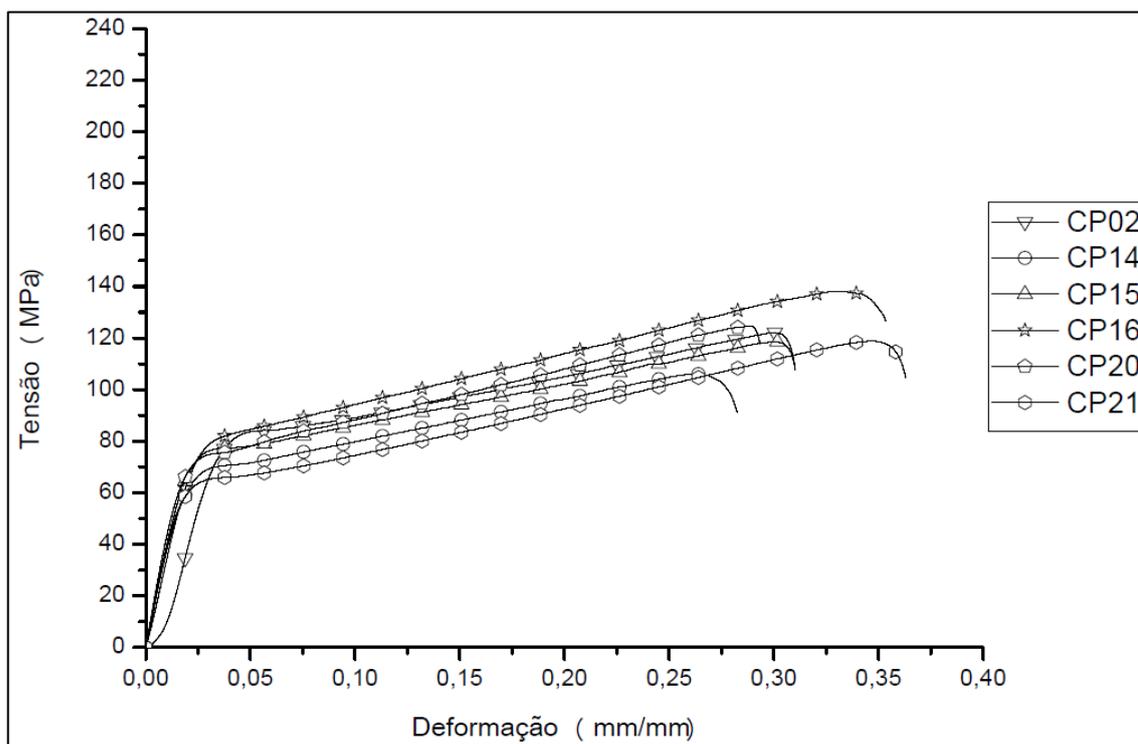
Fonte: Elaboração própria

Figura 51 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 160 °C



Fonte: Elaboração própria

Figura 52 - Curvas tensão x deformação das amostras com tratamento térmico a temperatura de 180 °C



Fonte: Elaboração própria

Também para as curvas de tensão x deformação de cada temperatura foram determinados valores médios de força, deslocamento, tensão e deformação, que estão apresentados nas Tabelas Tabela 9 a Tabela 16.

Tabela 9 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 40°C

| T40 | | | | |
|-----------------------|----------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Fmáx (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 316,2289 | 4,0470 | 0,0506 | 213,1564 |
| Desvio Padrão | 21,7976 | 0,5331 | 0,0067 | 8,2067 |
| Coef. de Variação (%) | 6,890 | 13,17 | 13,17 | 3,85 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 60°C

| T60 | | | | |
|-----------------------|----------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Fmáx (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 196,3010 | 25,0581 | 0,3132 | 137,9149 |
| Desvio Padrão | 18,1302 | 3,9250 | 0,0491 | 13,1865 |
| Coef. de Variação (%) | 9,23 | 15,66 | 15,66 | 9,56 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 80°C

| T80 | | | | |
|-----------------------|----------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Fmáx (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 238,9091 | 9,3137 | 0,1164 | 151,4130 |
| Desvio Padrão | 33,5421 | 1,0560 | 0,0132 | 8,6296 |
| Coef. de Variação (%) | 14,04 | 11,34 | 11,34 | 5,70 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 100°C

| T100 | | | | |
|-----------------------|----------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Fmáx (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 178,8167 | 9,1451 | 0,1143 | 104,6911 |
| Desvio Padrão | 22,1003 | 1,0251 | 0,0128 | 10,1749 |
| Coef. de Variação (%) | 12,36 | 11,21 | 11,21 | 9,72 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 120°C

| T120 | | | | |
|-----------------------|----------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Fmáx (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 241,5542 | 13,4142 | 0,2093 | 121,8763 |
| Desvio Padrão | 14,2673 | 1,3916 | 0,0217 | 7,2898 |
| Coef. de Variação (%) | 5,91 | 10,37 | 10,37 | 5,98 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 14 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 140°C

| T140 | | | | |
|-----------------------|----------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Fmáx (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 173,4310 | 9,3862 | 0,1529 | 95,4974 |
| Desvio Padrão | 11,8361 | 1,4653 | 0,0239 | 8,7510 |
| Coef. de Variação (%) | 6,82 | 15,61 | 15,61 | 9,16 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 160°C

| T160 | | | | |
|-----------------------|----------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Fmáx (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 214,7129 | 12,6776 | 0,2186 | 106,3874 |
| Desvio Padrão | 12,7814 | 0,4781 | 0,0082 | 7,7795 |
| Coef. de Variação (%) | 5,95 | 3,77 | 3,77 | 7,31 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 16 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à tração e deformação a 180°C

| T180 | | | | |
|-----------------------|----------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Fmáx (N) | Deslocamento (mm) | Deformação (mm/mm) | Tensão (MPa) |
| Média | 230,7958 | 14,0989 | 0,3154 | 121,3561 |
| Desvio Padrão | 24,0415 | 1,4337 | 0,0291 | 10,3348 |
| Coef. de Variação (%) | 10,42 | 10,16 | 9,21 | 8,52 |

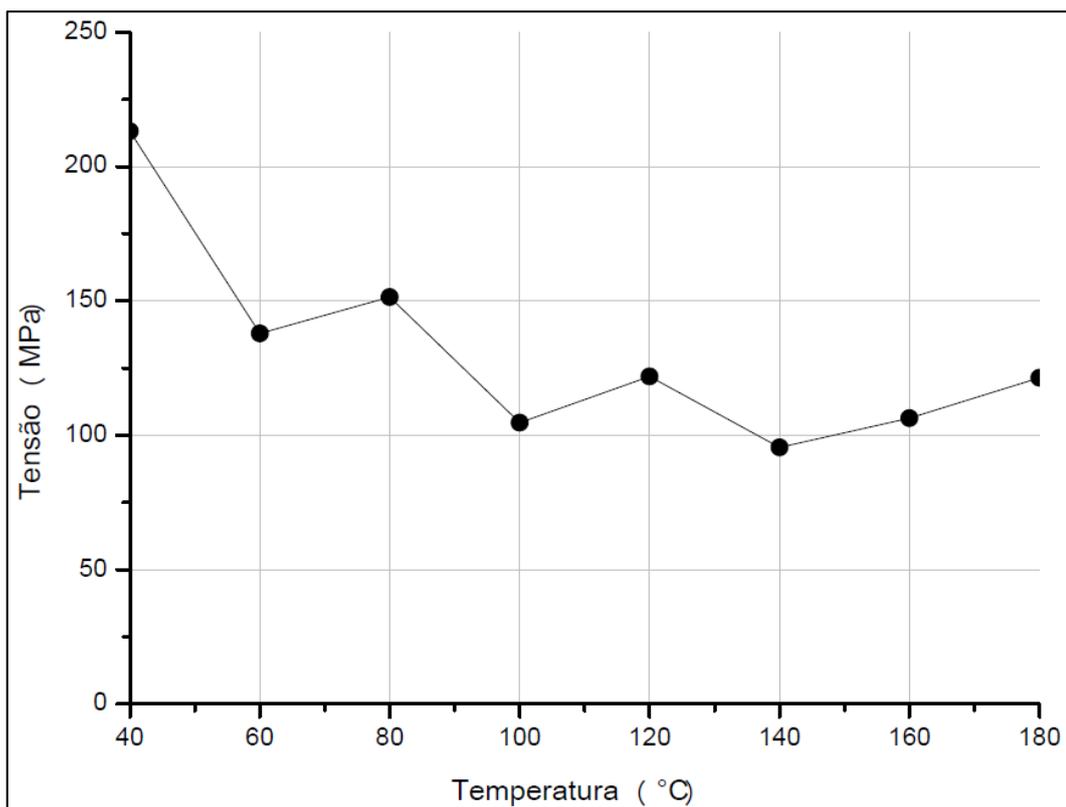
Fonte: Elaboração própria

O comportamento de cada grupo aquecido se mostrou diferente em relação ao comportamento ao rompimento e resistência. Houve redução da resistência à tração até a temperatura de 140°C, de 55,19% em relação a maior resistência que ocorreu na temperatura de 40°C, com valor de 213,15MPa, que superou em 18,7% em relação a amostra em temperatura ambiente. Na temperatura de 180°C ocorreu aumento na

resistência em relação as amostras de 140°C, de 21,31%, e deformação máxima em relação a todas as temperaturas, com resultados muito próximos das amostras de 60°C.

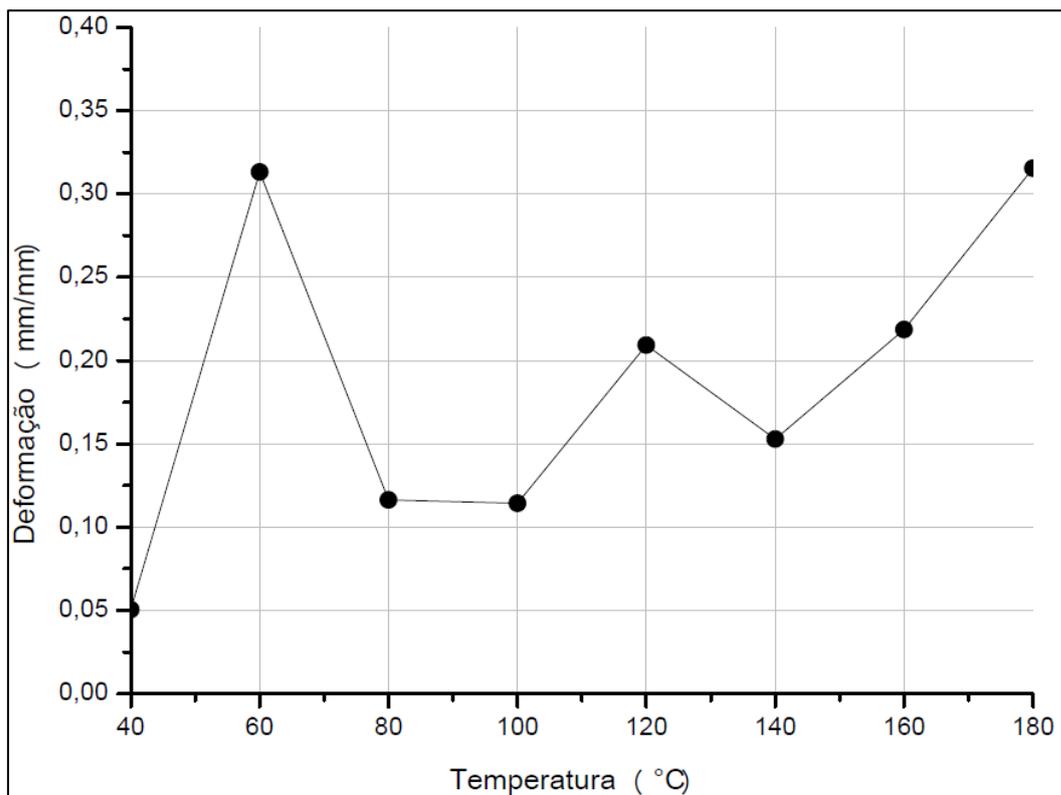
As Figuras Figura 53 e Figura 54 demonstram a variação da tensão e deformação respectivamente em relação as temperaturas.

Figura 53 - Variação de tensão x temperatura das amostras



Fonte: Elaboração própria

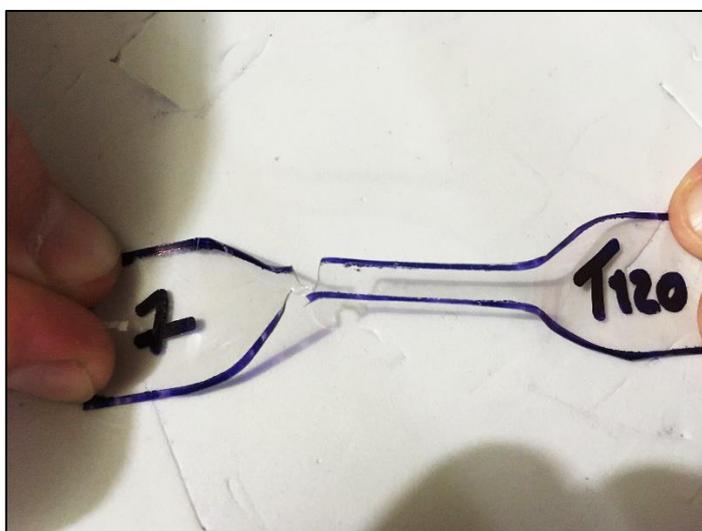
Figura 54 -Variação da deformação até o rompimento x temperatura das amostras



Fonte: Elaboração própria

O rompimento dos corpos de provas a partir da temperatura de 80°C, acima da temperatura de transição vítrea, romperam de forma mais dúctil. Em alguns casos não ocorreu a separação em duas partes do corpo de prova (Figura 55), apenas cortes laterais na tensão de ruptura do material.

Figura 55 - Ruptura da amostra sem reparação



Fonte: Elaboração própria

4.3 Ensaio de arrancamento

Os ensaios de arrancamento foram separados em idades, de três e sete dias, e as curvas de força x deslocamento para o comprimento de embebiamento de 25mm é mostrada na Figura 56.

Figura 56 - Ensaio de arrancamento da fibra



Fonte: Elaboração própria

Os valores médios de força de tração, deslocamento e tensão de cisalhamento na fibra, que é calculado pela razão entre força de tração e a área de contato da fibra com a matriz, estão presentes nas Tabela 17 a Tabela 20.

Tabela 17 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à cisalhamento da fibra com tratamento mecânico superficial com idade de 3 dias

| Fibra - Tratamento Mecânico Superficial | | | |
|---|-------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Idade - 3 dias | Força Máx. (N) | Deslocamento Máx. (mm) | Tensão de Cisalhamento (MPa) |
| Média | 142,4811 | 6,3222 | 0,5428 |
| Desvio Padrão | 21,1241 | 2,3841 | 0,0805 |
| Coeficiente de Variação (%) | 14,83 | 37,71 | 14,83 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 18 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à cisalhamento da fibra sem tratamento com idade de 3 dias

| Fibra – Lisa | | | |
|-----------------------------|----------------|------------------------|------------------------------|
| Idade - 3 dias | Força Máx. (N) | Deslocamento Máx. (mm) | Tensão de Cisalhamento (MPa) |
| Média | 70,4755 | 6,0089 | 0,2685 |
| Desvio Padrão | 5,2172 | 3,7545 | 0,0199 |
| Coeficiente de Variação (%) | 7,40 | 62,48 | 7,40 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 19 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à cisalhamento da fibra com tratamento mecânico superficial com idade de 7 dias

| Fibra - Tratamento Mecânico Superficial | | | |
|---|----------------|------------------------|------------------------------|
| Idade - 7 dias | Força Máx. (N) | Deslocamento Máx. (mm) | Tensão de Cisalhamento (MPa) |
| Média | 174,7462 | 9,5354 | 0,6657 |
| Desvio Padrão | 11,4977 | 0,5004 | 0,0438 |
| Coeficiente de Variação (%) | 6,58 | 5,25 | 6,58 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 20 - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da força máxima, deslocamento de ruptura, resistência à cisalhamento da fibra com tratamento mecânico superficial com idade de 7 dias

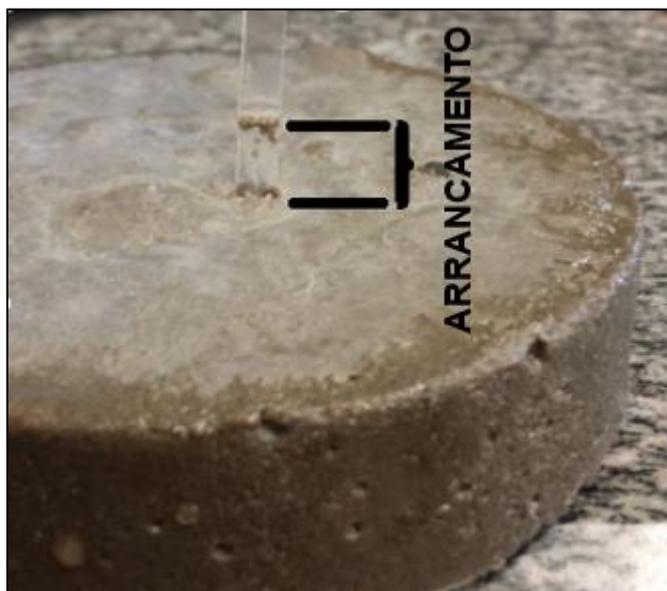
| Fibra – Lisa | | | |
|-----------------------------|----------------|------------------------|------------------------------|
| Idade - 7 dias | Força Máx. (N) | Deslocamento Máx. (mm) | Tensão de Cisalhamento (MPa) |
| Média | 80,9873 | 2,1808 | 0,3085 |
| Desvio Padrão | 13,9629 | 0,2045 | 0,0531 |
| Coeficiente de Variação (%) | 17,24 | 9,38 | 17,24 |

Fonte: Elaboração própria

Verifica-se que o tratamento mecânico aumenta significativamente a interface entre matriz e fibra, comparando a força de arrancamento, para idade de três dias, houve um aumento de 115,77% e 102,17%, para idade de sete dias, em comparação com a fibra lisa.

A Figura 57 demonstra o deslizamento no arrancamento da fibra lisa na matriz, que na fibra com tratamento não ocorre visivelmente.

Figura 57 - Arrancamento da fibra lisa aos 3 dias



Fonte: Elaboração própria

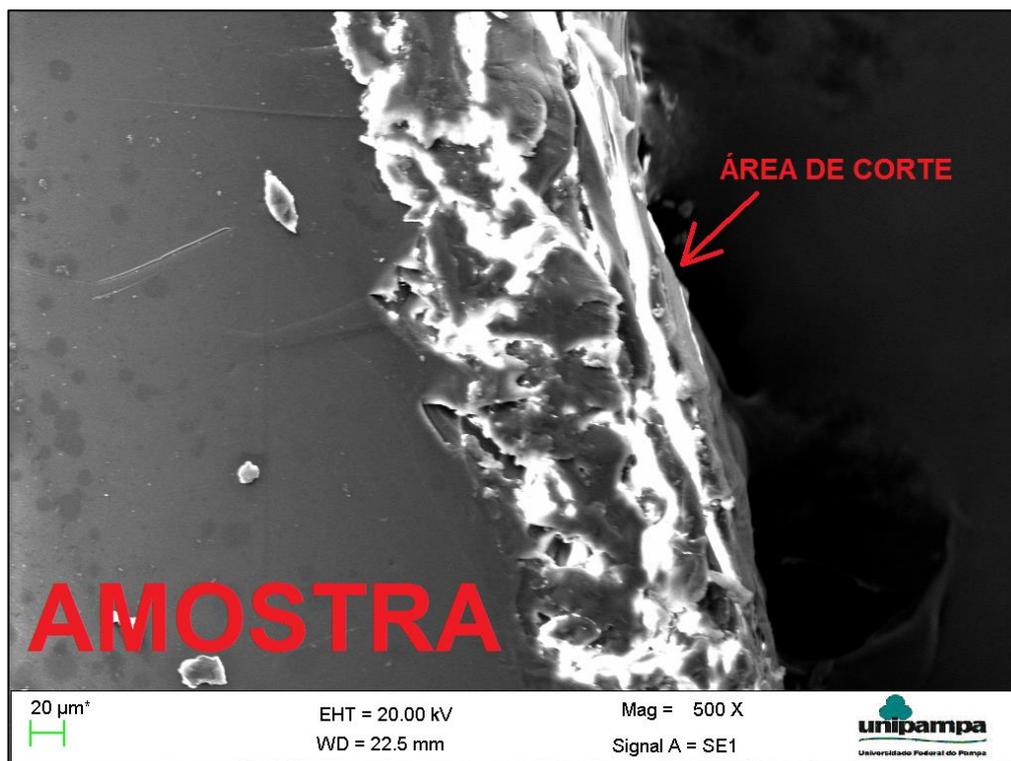
Este aumento na força de arrancamento da fibra na matriz pode ser explicado pelo formato gerado pela conformação realizada no tratamento mecânico superficial, garantindo, assim, segundo Bentur e Mindess (2007) uma maior ligação microestrutural entre elemento de reforço e matriz.

4.4 Microscopia eletrônica de varredura

Com o intuito de verificar alterações realizadas na superfície de corte, com a redução de pontos de falha no PET com o aumento de temperatura, foram ensaiadas amostras em todas as temperaturas do tratamento térmico.

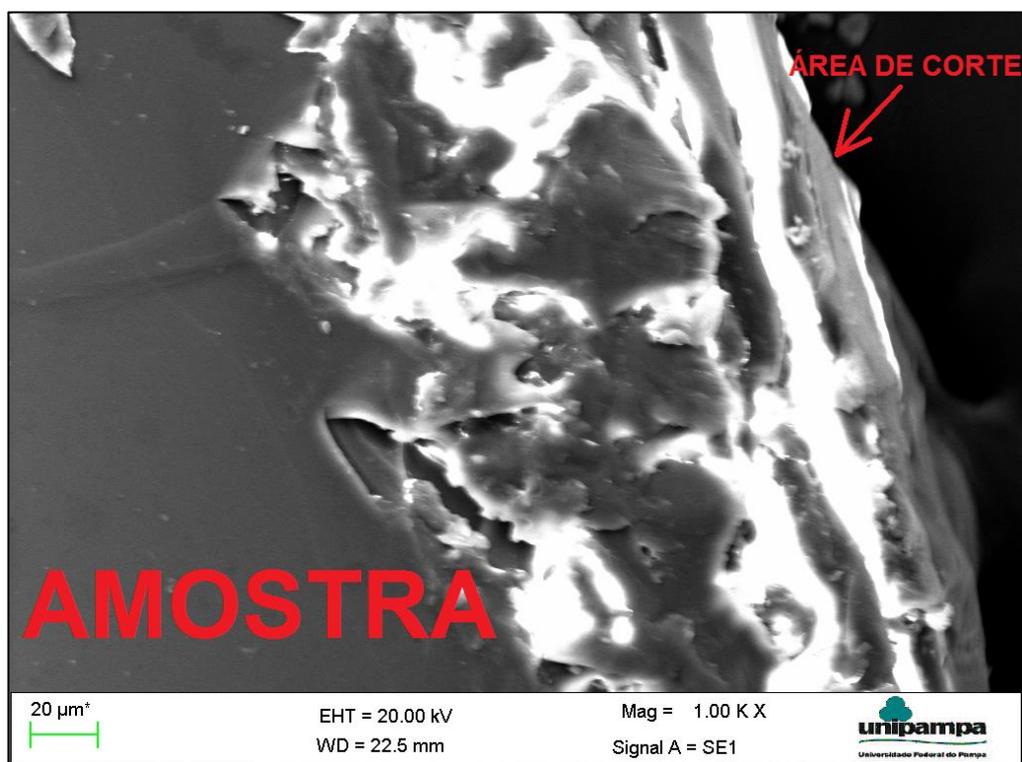
Cada amostra teve duas ampliações de 200x ou 500x, para garantir melhor visualização e 1000x, que estão apresentadas das Figura 58 a Figura 73, de cada respectiva temperatura.

Figura 58 - Amostra - Temperatura 40°C - Ampliação de 500x



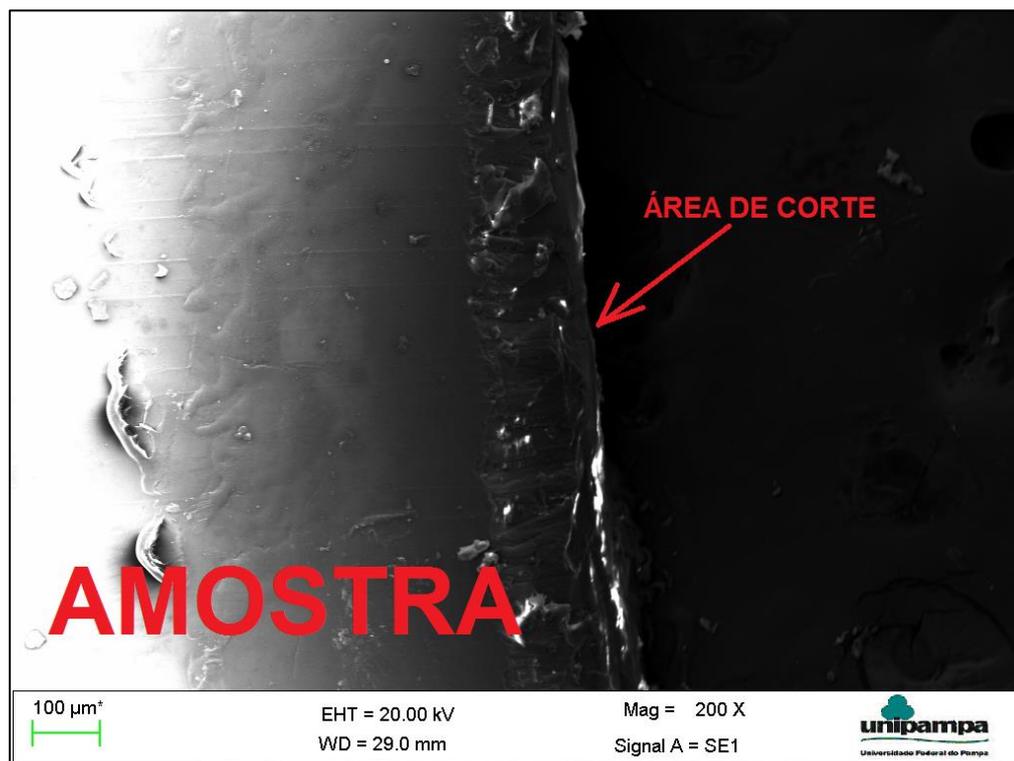
Fonte: Acervo Próprio

Figura 59 - Amostra - Temperatura 40°C - Ampliação de 1000x



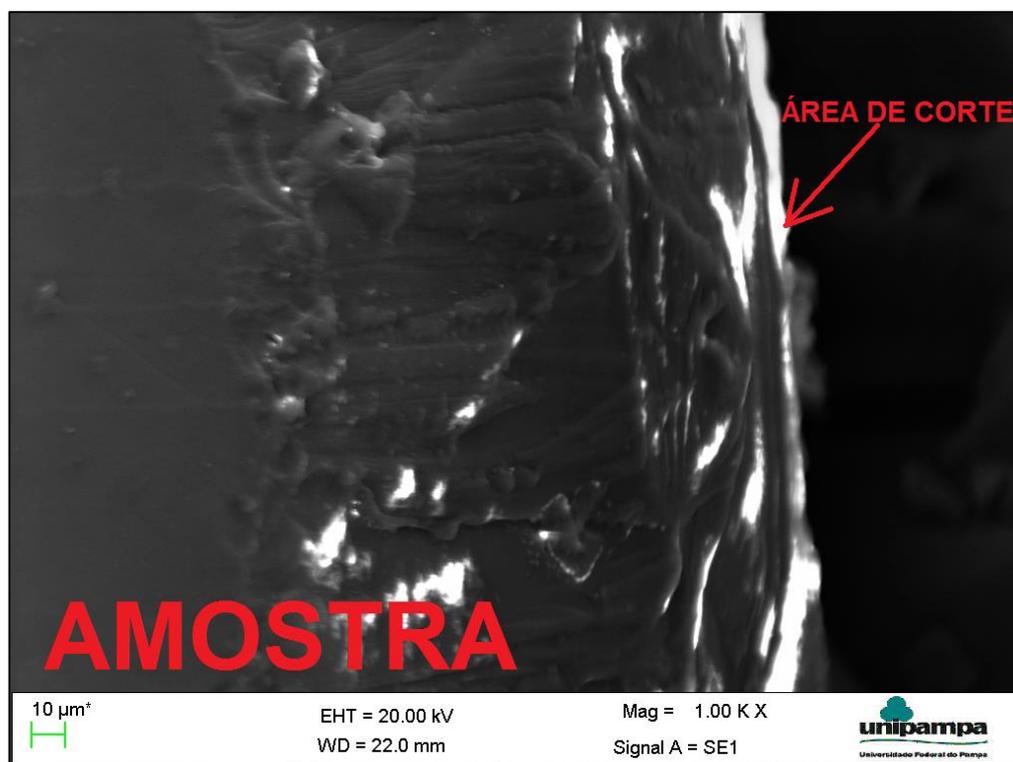
Fonte: Acervo Próprio

Figura 60 - Amostra - Temperatura 60°C - Ampliação de 500x



Fonte: Acervo Próprio

Figura 61 - Amostra - Temperatura 60°C - Ampliação de 1000x

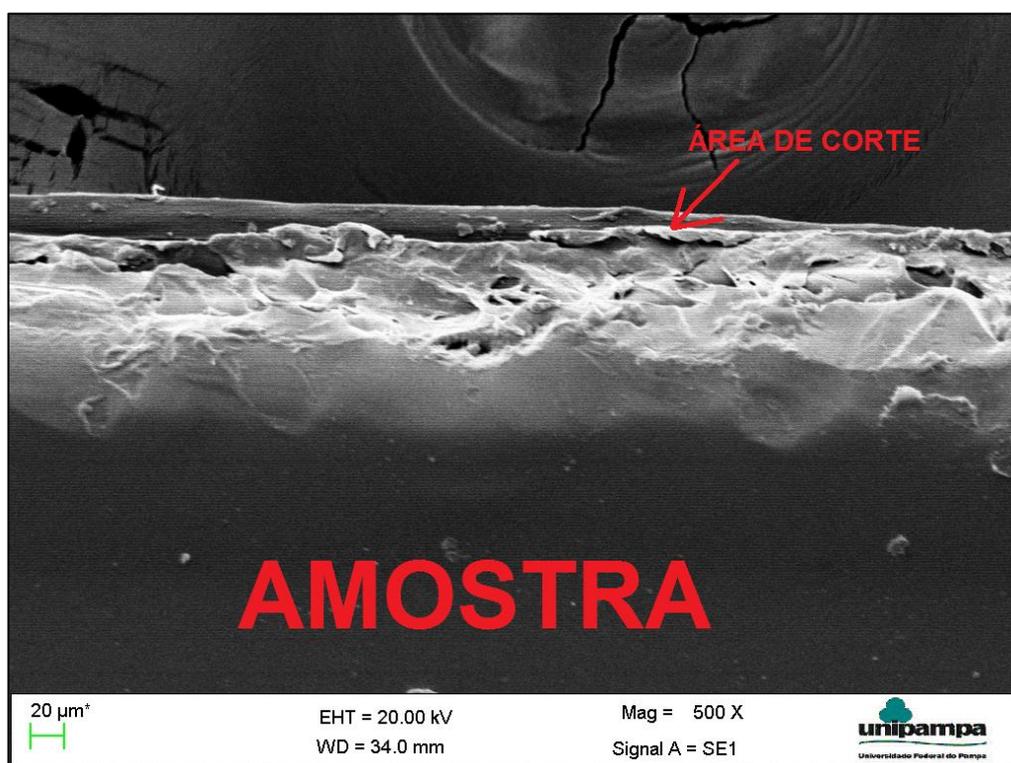


Fonte: Acervo Próprio

Pontos claros nas Figuras são áreas onde os átomos de ouro não aderiram a superfície do plástico, mesmo com a sucessiva metalização de superfície. As imagens que apresentam como as Figura 61 e Figura 60, foram realocadas para a região onde os focos claros eram menores.

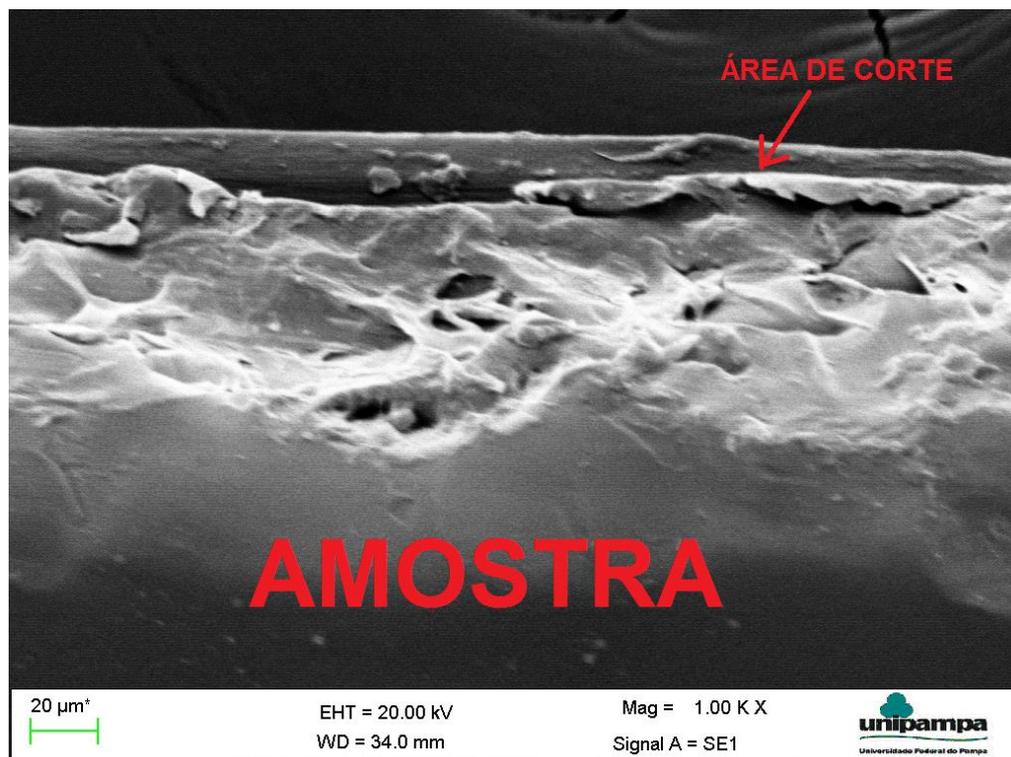
Nas amostras de 60°C é possível notar a diferença na superfície com a redução significativa de poros e vazios, com a presença de laminação da borda da amostra, resultando em amostras com menor pontos de acúmulos de tensão.

Figura 62 - Amostra - Temperatura 80°C - Ampliação de 500x



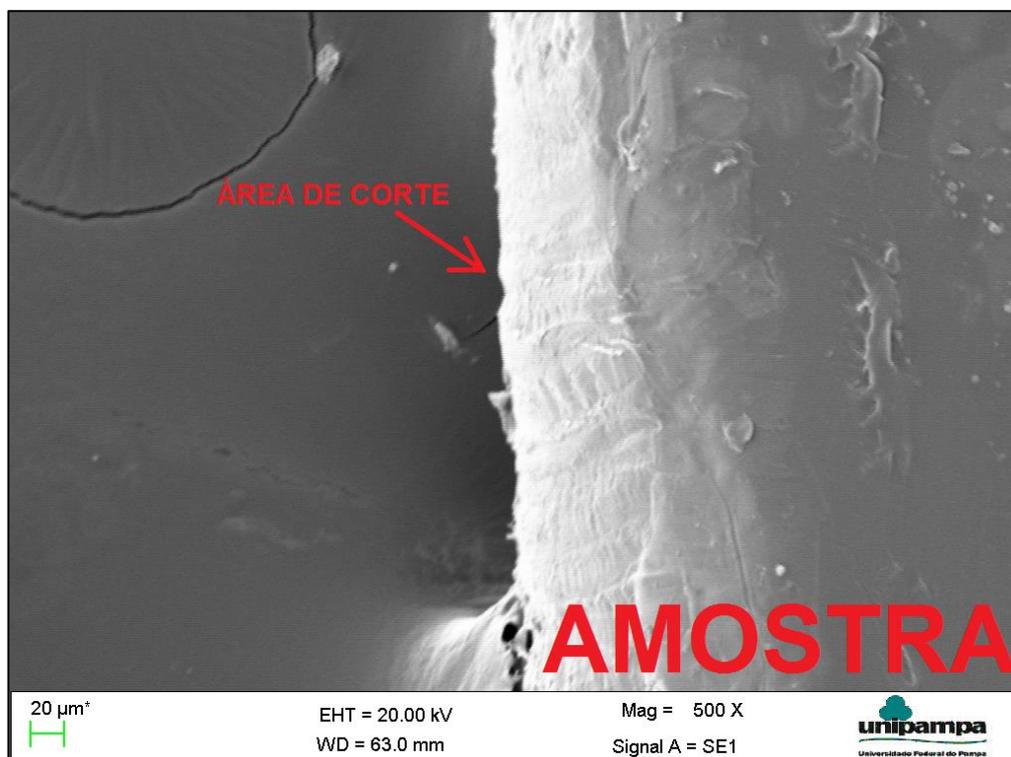
Fonte: Acervo Próprio

Figura 63 - Amostra - Temperatura 80°C - Ampliação de 1000x



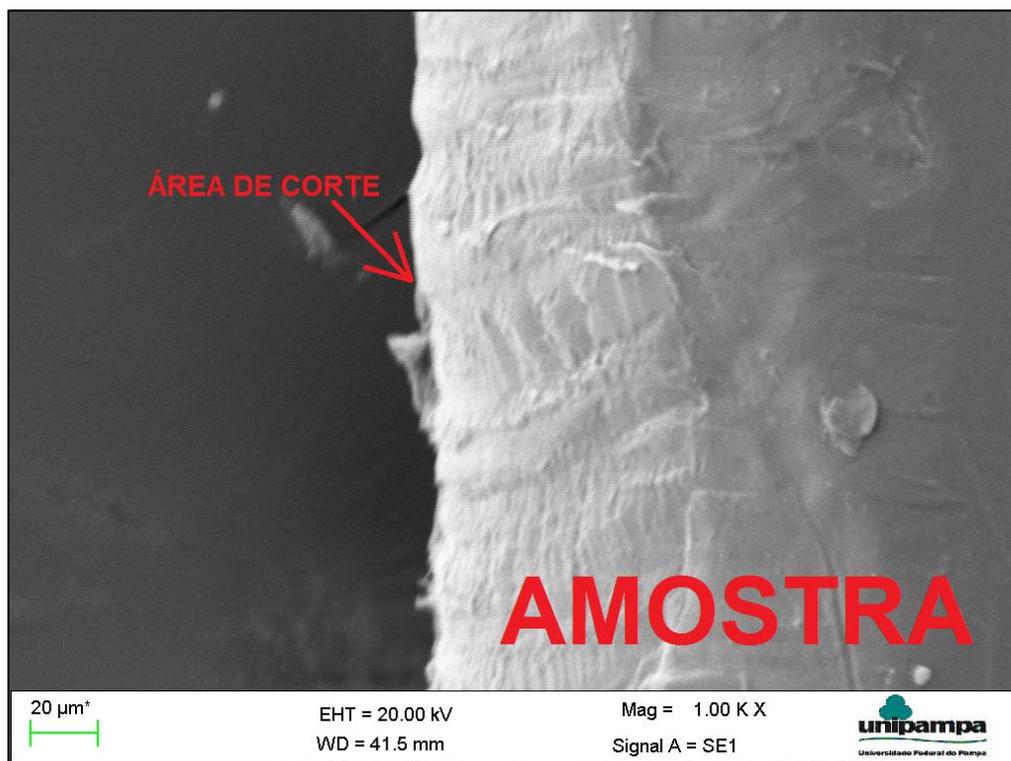
Fonte: Acervo Próprio

Figura 64 - Amostra - Temperatura 100°C - Ampliação de 500x



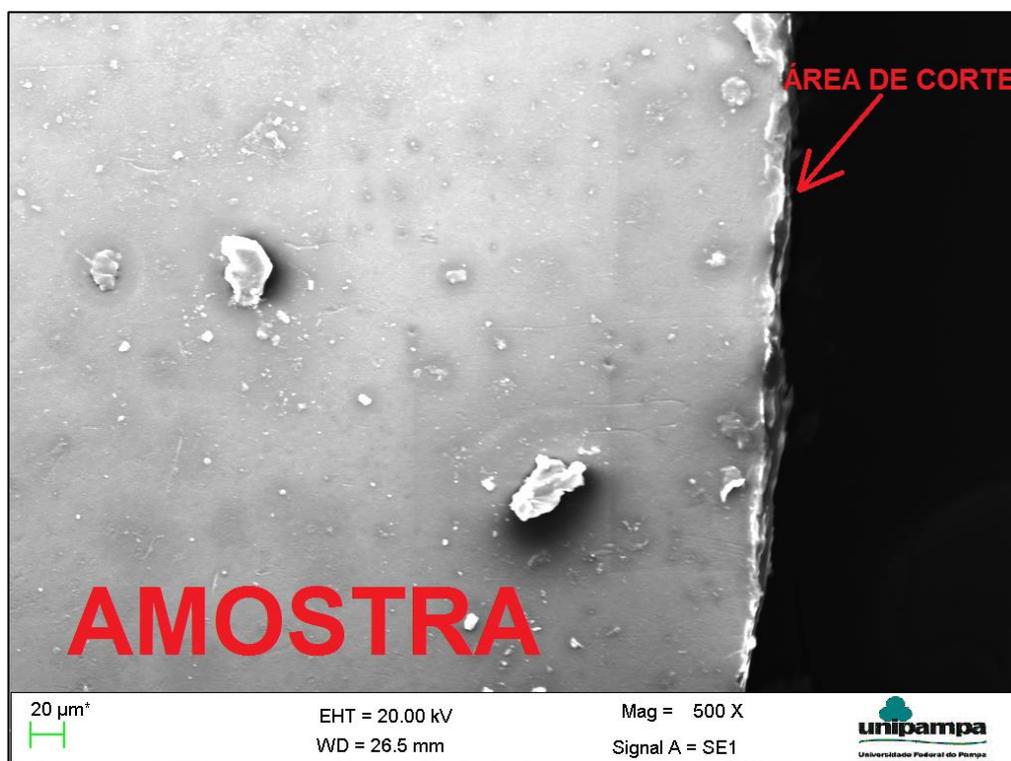
Fonte: Acervo Próprio

Figura 65 - Amostra - Temperatura 100°C - Ampliação de 1000x



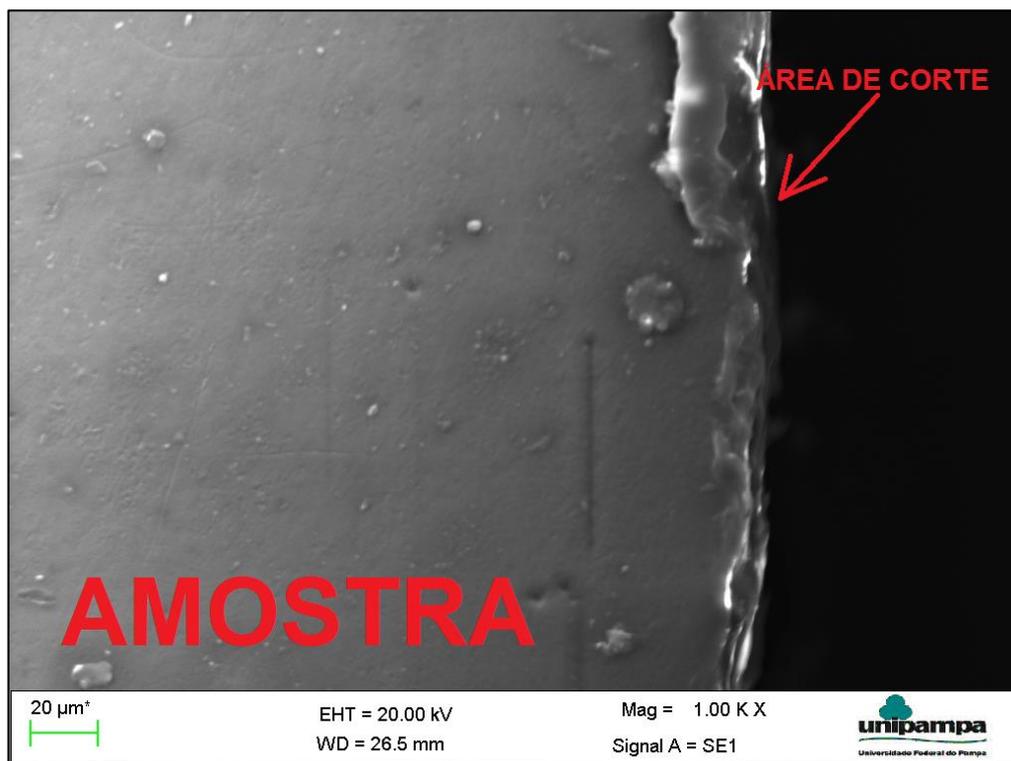
Fonte: Acervo Próprio

Figura 66 - Amostra - Temperatura 120°C - Ampliação de 500x



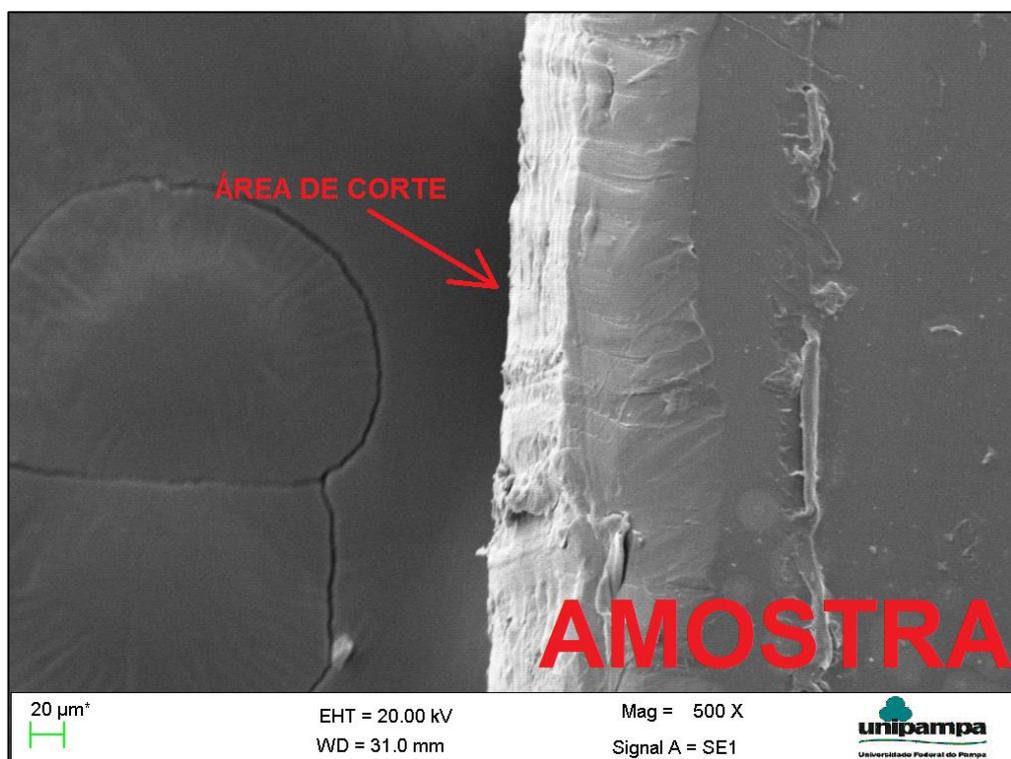
Fonte: Acervo Próprio

Figura 67 - Amostra - Temperatura 120°C - Ampliação de 1000x



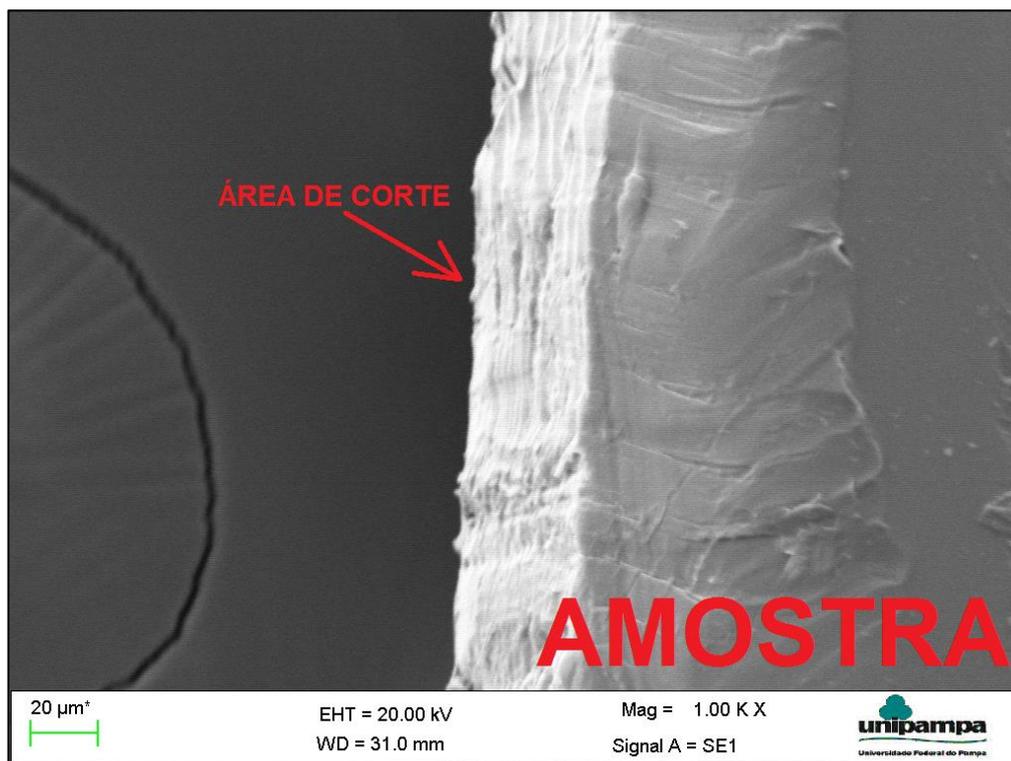
Fonte: Acervo Próprio

Figura 68 - Amostra - Temperatura 140°C - Ampliação de 500x



Fonte: Acervo Próprio

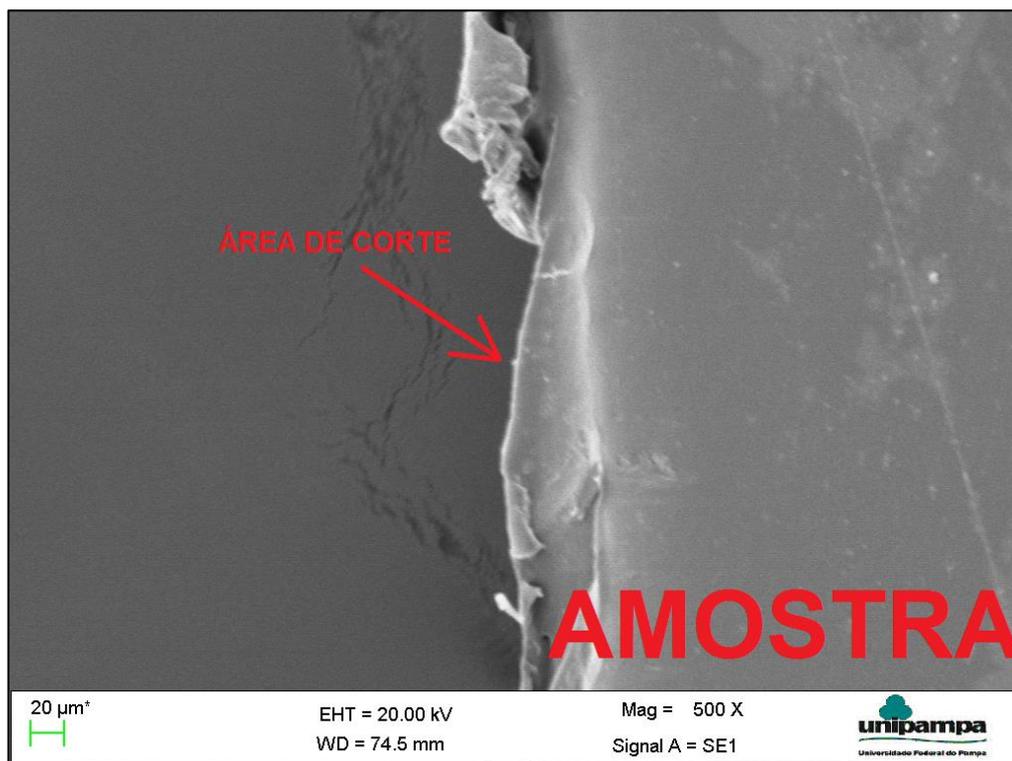
Figura 69 - Amostra - Temperatura 140°C - Ampliação de 1000x



Fonte: Acervo Próprio

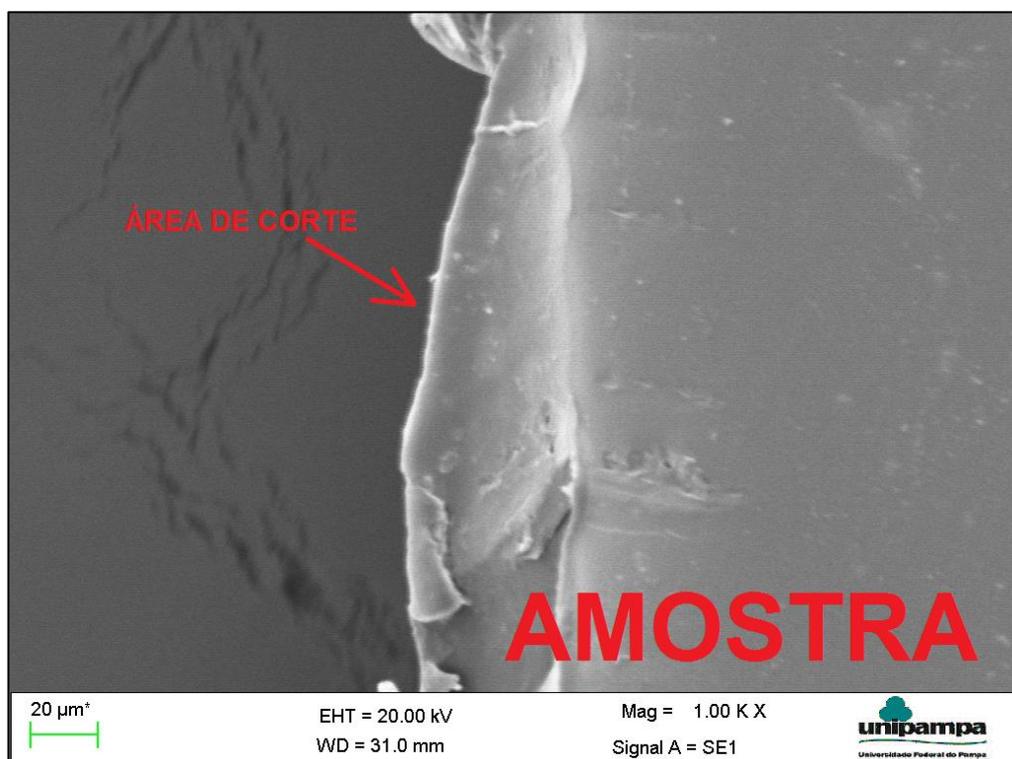
A amostra de 140°C apresentam alta laminação de borda, em comparação as demais, mesmo não apresentando vazios laterais.

Figura 70 - Amostra - Temperatura 160°C - Ampliação de 500x



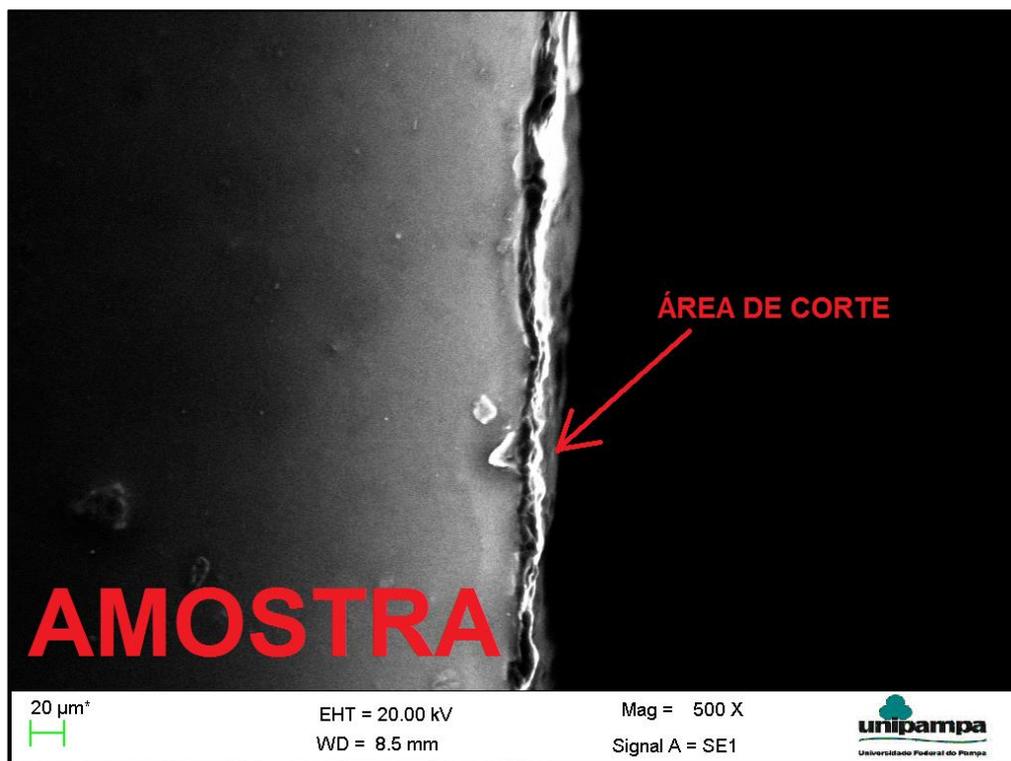
Fonte: Acervo Próprio

Figura 71 - Amostra - Temperatura 160°C - Ampliação de 1000x



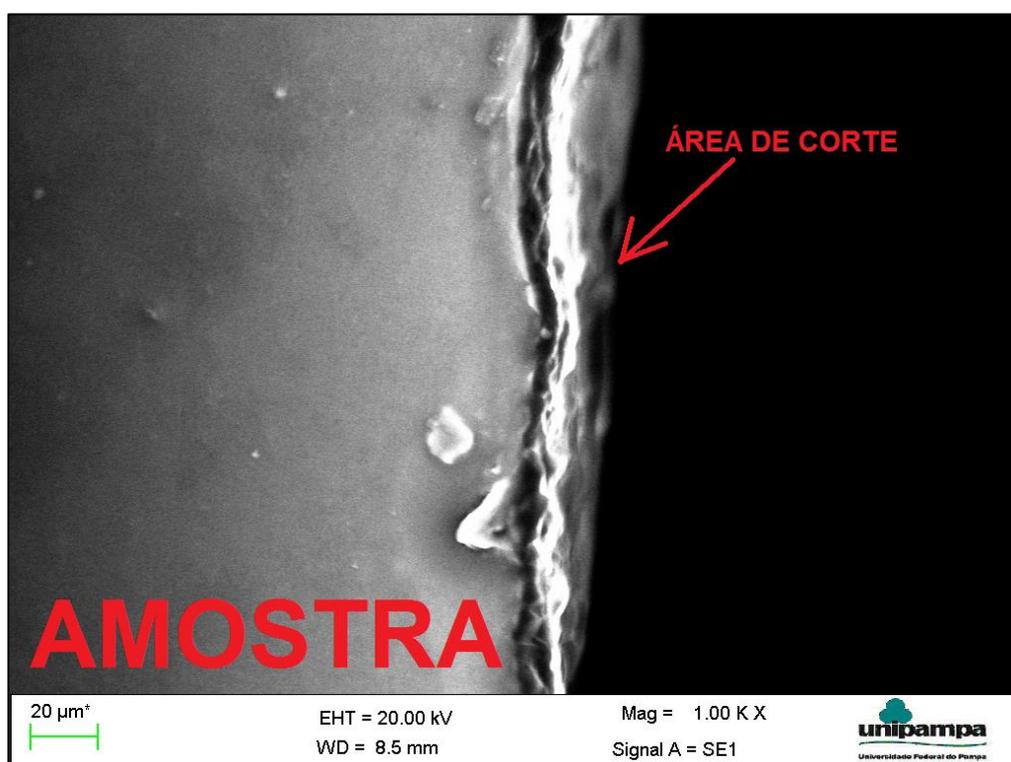
Fonte: Acervo Próprio

Figura 72 - Amostra - Temperatura 180°C - Ampliação de 500x



Fonte: Acervo Próprio

Figura 73 - Amostra - Temperatura 180°C - Ampliação de 1000x



Fonte: Acervo Próprio

Com o aumento de temperatura e passagem da temperatura de transição vítrea as amostras demonstram uma área de corte mais homogênea com o aumento da temperatura com a diminuição de vazios e laminações de borda. Há uma possível causa da diminuição e aumento da resistência, as amostras estão ligadas diretamente as características das áreas de corte.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

As principais conclusões retiradas do trabalho são:

Arrancamento das fibras:

- As fibras com tratamento mecânico apresentaram maiores forças ao arrancamento, resultante de uma melhor interface de ligação entre os materiais, devido a uma melhor ligação microestrutural do elemento de reforço com a matriz.

- As tensões de cisalhamento aos três dias variaram de 0,4518 a 0,6046 MPa, com tratamento mecânico, e 0,2914 e 0,2569 MPa para as fibras lisas. Já aos sete dias 0,6226 a 0,7102 MPa para amostras com tratamento mecânico e 0,2522 a 0,3579 MPa para amostras com superfície lisa. Demonstrando que o aumento significativo de tensão é a prova que esta conformação atribui características mais homogêneas e de reforço no compósito.

- A falta de aderência da fibra lisa não representou diferença entre as idades de hidratação da argamassa, e sim, com a característica superficial do elemento, estando ligada a camada de hidróxido de cálcio como salientado por Bentur e Mindess (2007), causado pela falta de adesividade superficial.

Tração direta:

- A adição de corante para a pigmentação das garrafas, como agente estético, não alterou resistência à tração em comparação as amostras sem pigmentação (transparentes), o coeficiente de variação das médias de resistência englobou todas as resistências de ambos os grupos, pois a diferença de 173 MPa a 176 MPa não acarreta uma separação de amostras por cor, apenas em regiões da própria garrafa pela diferença entre cristalização em regiões. Portanto se fez necessário a releção de garrafas de mesma marca e mesma região da garrafa para a retirada das amostras. É importante salientar que todas as amostras foram retiradas na direção perpendicular a mesma, não podendo afirmar que a garrafa tenha entropia ou sintropia, caracterizando o material como alotrópico ou não.

- A deformação de ambas as cores foram semelhantes de 0,06533 mm/mm para as amostras transparentes e 0,06902 mm/mm para amostras verdes, com variação entre médias de 5,34% menor que o coeficiente de variação para as brancas de 22,28% e 19,02% para as verdes.

- Observou-se que nas curvas das amostras brancas não ocorreu uma grande sobreposição como nas curvas das verdes, verificado pelo coeficiente de variação de tensão de 7,90%, das transparentes, e 6,80%, para as verdes, ainda sim uma pequena desigualdade de dados.

- Em relação as amostra com tratamento térmico ocorreu uma flutuação de deformações e tensões, em relação a resistência à tração, a temperatura de 40°C destaca-se em comparação as amostras verdes e transparentes em temperatura ambiente e as demais amostras com tratamento térmico. Os tratamentos térmicos que apresentam melhores valores de resistências em ordem decrescente foram: 40°C; 80°C; 60°C; 120°C; 180°C; 160°C; 100°C e 140°C.

- As deformações das amostras apresentaram um discrepância na temperatura de 60°C, onde há diferença entre a amostra na temperatura de 40°C de 619,17%, porém em comparação a temperatura de 180°C, que ocorreu a maior deformação com valor de 0,3154mm/mm, é de apenas 0,6957%.

- Pode-se verificar que em temperaturas maiores que a temperatura ambiente a fibra apresenta uma diminuição de resistência, porém a menor resistência à tração foi de 95,49 MPa na temperatura de 140°C, que segundo Marinho (2005) em utilizações onde seja necessário resistência a impacto a esta temperatura o PET desempenha ótimas características. E como salientado pelo mesmo autor para temperaturas onde o aquecimento temporário de até 175°C, no caso deste estudo 180°C o PET desempenhou sua melhor deformação e uma resitência de 121,35 MPa, garantindo a utilizações como na matriz de concreto uma possível diminuição de fissuras e aumento de resistência se empregado em áreas de flexão e tração.

- Torna-se viável a utilização de fibras de PET em misturas em temperaturas elevadas, pois não há o derretimento das fibras na matriz e possível, endurecimento no aumento de regiões puramente cristalinas.

Microscopia eletrônica de varredura:

- Na microscopia as amostras aplicadas no tratamento térmico, houve apresentação de vazios e incostância de superfície nas amostras de 40°C e 80°C, e melhores superfícies na amostra de 60°C, onde há pequena laminação e homogeneidade, seguidas da amostra de 160°C que não apresenta laminação, porém com área mais inconstante de corte.

- As amostras de 180°C e 120°C apresentaram áreas de corte semelhantes, onde não ocorreu laminação, apenas variação de superfície sem presença de vazios, porém nas amostras de 140°C e 100°C fica visível a grande laminação de corte, verificando maior presença na amostra de 140°C, que apresentou menor resistência à tração.

- A laminação é uma possível causa de diminuição de resistência, que quando não apresentada, há um aumento na resistência, podendo ser verificada na relação da Figura 53 com as figuras provenientes do MEV.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para melhor caracterização da relação entre tratamentos superficiais e térmicos na produção de fibras, provindas da reciclagem de garrafas PET, sugerem-se estudos adicionais:

- aplicação de difração de raio X para determinação de regiões amorfas e cristalinas em relação as propriedades mecânicas do PET;

- aplicação de tratamentos térmicos nas mesmas temperaturas por períodos de exposição a temperatura diferentes e resfriamentos decrescentes, sem resfriamento abrupto em temperatura ambiente;

- determinação de métodos de corte de filetes mais precisos, com diminuição da espessura do filete, com a relação entre a espessura e a diminuição de fissuras em concreto Portland e de fluência em concreto asfáltico;

- aplicação da fibra de PET em concreto asfáltico e determinação das propriedades mecânicas do compósito;

- aplicação da fibra de PET em elemento de reforço em diferentes comprimentos na utilização em solos;

- determinar a diminuição da fluência em concreto armado, verificando a diminuição das aberturas de fissuras e aumento da quantidade de fissuras, como agente majorador de durabilidade.

REFERÊNCIAS

ABIPET – **Associação Brasileira da Indústria do pet.** 2016. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=81>>. Acesso em: 26 fev. 2016.

ABIPET – **Associação Brasileira da Indústria do pet.** 2017. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=46>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

ABIPET – **Associação Brasileira da Indústria do pet.** 2017. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=7>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

ABIPET – **Associação Brasileira da Indústria do pet.** 2017. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=72>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites.** 2ed., New York, NY, 2007.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L.P. **Pavimentos Rodoviários.** Palheira, Assafarge, 2008.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros.** 3. ed. São Paulo: Artliber, 2002.

ECYCLE. **eCYCLE** 2017. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/44-guia-da-reciclagem/2046-reciclagem-o-que-e-como-surgiu-reaproveitamento-upcycle-origem-como-reciclar-coleta-seletiva-onde-reciclar.html>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

HECK, A.F. **Análise da Viabilidade do Uso de Fibras de Polipropileno como Material de Reforço em Pavimentos Asfálticos.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

IFA - **Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance.** Disponível em: <[http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/530566.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/530566.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)>. Acesso: 27 fev. 2016.

LOKENS GARD, E. **Plásticos Industriais – Teorias e Aplicações**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. **Caracterização dos Polímeros: Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2001.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 1. Ed. São Paulo: Blucher, 1991.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos**. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2013.

MARINHO, J. R. D. **Macromoléculas e Polímeros**. 1 ed. Barueri: Manole, 2005.

MICHAELI, W; GREIF, H; KAUFMANN, H; VOSSEBÜRGER, F. J. **Tecnologia dos Plásticos**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 1995.

PELED, A.; BENTUR, A. Reinforcement of cementitious matrices by warp knitted fabrics. **Materials and Structures**, v. 31, p. 543-550, 1998.

Portal dos Resíduos Sólidos. **Reciclagem de pneus**. 2017. Disponível em: <<http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-pneus/>>. Acesso em: 02 fev. 2017.

RUSSEL, J. B. **Química Geral**. 2. ed. v. 2. São Paulo: Pearson Makron Books, 1994.

SIMIELLI, E. R; SANTOS, P. A. **Plásticos de Engenharia: Principais tipos e sua moldagem por injeção**. 1 ed. São Paulo: Artliber, 2010.

VAN VLACK, L. **Princípios de ciência dos materiais**. 1970. 13. Ed. São Paulo. Edgard Blucher. 1970.