

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA

CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DA FIBRA DE PET COMO REFORÇO
EM COMPÓSITOS COM POLIÉSTER**

MATHEUS VINÍCIUS FALCÃO MOREIRA

FEIRA DE SANTANA, 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA

CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DA FIBRA DE PET COMO REFORÇO
EM COMPÓSITOS COM POLIÉSTER**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
como parte dos requisitos para obtenção do
título de **Bacharel em Engenharia de
Materiais.**

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a Joyce Batista Azevedo.

Coorientadora: Prof.^a. Dr.^a Imarally Vitor de Souza Ribeiro Nascimento.

MATHEUS VINÍCIUS FALCÃO MOREIRA

FEIRA DE SANTANA, 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

AVALIAÇÃO DA FIBRA DE PET COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS COM POLIÉSTER

Aprovada em: 11 /12 /2020

EXAMINADORES:

Profa. Dra. Joyce Batista Azevedo

Joyce Batista Azevedo

Prof. Dr. Adillys Marcelo da Cunha Santos

Adillys Marcelo da Cunha Santos

Profa. Dra. Keila Machado de Medeiros

Keila Machado de Medeiros

MATHEUS VINICIUS FALCÃO MOREIRA

FEIRA DE SANTANA, 2020

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, por todos os momentos que me apoiou e me deu forças no decorrer dessa jornada, sem ela tudo seria mais difícil nesta caminhada. A meu pai, por todo apoio e suporte que me proporcionou desde o início da minha jornada acadêmica. A minha avó, por todas as vezes que me encheu de esperança e me mandou energias positivas para o futuro. A meus amigos, pelos conselhos e conversas que tanto me incentivaram. Bem como a todos os docentes do curso de Engenharia de Materiais, que de alguma forma agregaram positivamente na minha formação, em especial a minha orientadora Joyce Batista Azevedo pelo direcionamento e confiança estabelecidos em mim desde o início do segundo ciclo da graduação até no decorrer deste trabalho. Ao SENAI CIMATEC por todo apoio na execução dos ensaios térmicos, mecânicos e morfológicos utilizados nessa pesquisa.

Dedico este trabalho aos meus amigos e familiares, em especial a minha esposa, que muito colaboraram para sua realização.

“Melhor professor, o fracasso é”.

(MESTRE YODA)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA

CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RESUMO

Compósitos reforçados com fibras representam 75% da aplicação destes materiais em diversos segmentos industriais. No entanto, busca-se aprimorar as características técnicas e redução do impacto ambiental através da utilização de matérias primas sustentáveis como fibras oriundas de resíduos industriais. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades mecânicas de um compósito de matriz de poliéster reforçado com 1%, 3% e 5% em massa de fibras de politereftalato de etileno (PET). A fibra utilizada é oriunda de um resíduo industrial gerado durante o processo de obtenção de tecidos utilizados em reforço na construção de pneus. Inicialmente as propriedades morfológicas, térmicas, de umidade e densidade das fibras foram avaliadas. Nos compósitos foram avaliadas as propriedades mecânicas sob flexão e resistência ao impacto e suas propriedades microestruturais. A partir dos resultados obtidos, foi possível constatar que a fibra de PET proporcionou melhorias significativas nas propriedades de resistência ao impacto dos compósitos, com destaque para os que continham 5% de fibra incorporada na matriz resultando em um aumento de mais de 300% nesta propriedade. As micrografias obtidas por MEV da morfologia da superfície de fratura dos compósitos, indicam que houve uma baixa força de adesão na interface entre as fibras de PET e a matriz de poliéster. Porém devem ser estudadas alternativas para melhorar a adesão e conformação das fibras na matriz, através de uma melhor distribuição das fibras na conformação dos compósitos, devido ao alto potencial de reforço apresentado por estas fibras para a obtenção de compósitos. Dessa forma, conclui-se que os compósitos reforçados com resíduo de fibra de PET apresentam vantagens no desenvolvimento de um novo material com características sustentáveis.

Palavras-chave: Compósitos, Fibra de PET, Resina de Poliéster.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA

CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

ABSTRACT

Fibre-reinforced composites represent 75% of the application of these materials in several industrial segments. However, it seeks to improve technical characteristics and reduce environmental impact through the use of sustainable raw materials as fibers from industrial waste. In this sense, the objective of this work was to evaluate the mechanical properties of a matrix composite of reinforced polyester with 1%, 3% and 5% by mass of polyethylene terephthalate (PET) fibers. The fiber used comes from an industrial waste generated during the process of obtaining fabrics used in reinforcement in tire construction. Initially the morphological, thermal, humidity and density properties of the fibers were evaluated. In composites, the mechanical properties under bending and impact resistance and their microstructural properties were evaluated. From the results obtained, it was possible to verify that the PET fiber provided significant improvements in the impact resistance properties of composites, especially those containing 5% of fiber incorporated in the matrix resulting in an increase of over 300% in this property. The micrographs obtained by SEM of the fracture surface morphology of composites indicate that there was a low adhesion strength at the interface between the PET fibers and the polyester matrix. However, alternatives to improve adhesion and fiber conformation in the matrix should be studied, through a better fiber distribution in composites conformation, due to the high reinforcement potential presented by these fibers to obtain composites. Thus, it is concluded that composites reinforced with PET fiber residue present advantages in the development of a new material with sustainable characteristics.

Key-words: Composites, PET Fiber, Polyester Resin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de classificação materiais compósitos (baseado em VENTURA, 2009).	18
Figura 2 - Classificação dos compósitos segundo o tipo de reforço (baseado em VENTURA, 2009).....	18
Figura 3 - Curva tensão-deformação esquemática para um compósito reforçado com fibras alinhadas (baseado em CALLISTER, 2002).....	19
Figura 4 - Interface plana ideal e interface rugosa formada entre reforço/matriz (baseado em CHAWLA, 2012).	21
Figura 5 - Tipos de matrizes dos materiais compósitos (baseado em VENTURA, 2009).....	22
Figura 6 - Fibra de PET proveniente da Kordsa (Autor).....	27
Figura 7 - Preparo do molde: a) silicone vertido; b) amostras de referência (Autor).....	28
Figura 8 - Molde obtido para os corpos de prova dos compósitos (Autor).....	28
Figura 9 - Molde de silicone contendo os corpos de prova durante a cura (Autor).	29
Figura 10 - Corpos de prova de resina pura obtidos (Autor).....	30
Figura 11 - Termograma DSC Fibra de PET (Autor).....	36
Figura 12 - Curva termogravimétrica da Fibra de PET (Autor).....	38
Figura 13- MEV da Fibra de PET aumento de: a) 17x; b) 27x; c) 700x (Autor).....	39
Figura 14 - Resistência ao Impacto de Compósitos com Fibra de PET (Autor).	39
Figura 15 - Módulo Elástico de compósitos com Fibra de PET (Autor).....	40
Figura 16 - Resistência a Flexão de compósitos com Fibra de PET (Autor).	40
Figura 17 - Topografia da fratura de resina pura de poliéster aumento de: a) 30x; b) 200x; c) 500x (Autor).	41
Figura 18 - Fratura compósito 1% Fibras de PET aumento de: a) 30x; b) 500x (Autor).....	42
Figura 19 - Fratura compósito 3% Fibras de PET aumento de: a) 30x; b) 100x; c) 200x (Autor).	43
Figura 20 - Fratura compósito 5% Fibras de PET aumento de: a) 30x; b) 100x; c) 200x (Autor).	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de cura da resina para concentração de catalisador adicionado.	29
Tabela 2 - Dados obtidos no ensaio de densidade das fibras.....	34
Tabela 3 - Umidade das fibras de PET em função da temperatura do ensaio em estufa.....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	ASPECTOS HISTÓRICOS DOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	16
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	17
2.3	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	17
2.3.1	Interface matriz-reforço	20
2.4	MATRIZ.....	21
2.4.1	Resina Poliéster Como Matriz Polimérica	22
2.5	REFORÇO.....	23
2.5.1	Fibras poliméricas	24
2.5.2	Fibras de PET Como Reforço	25
2.6	RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS.....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	MATERIAIS.....	27
3.1.1	Matriz Polimérica – Poliéster	27
3.1.2	Fibra Sintética – PET	27
3.2	MÉTODO.....	28
3.2.1	Obtenção do Molde de Silicone	28
3.2.2	Quantidade de Catalisador de Acordo com o Tempo de Cura	28
3.2.3	Produção dos Corpos de Prova Com 1, 3 e 5% de Fibras	29
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE PET.....	30
3.3.1	Densidade	30
3.3.2	Teor de Umidade	31
3.3.3	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	31
3.3.4	Termogravimetria (TGA)	32
3.3.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	32
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO.....	32
3.4.1	Ensaio Mecânico de Resistência ao Impacto	32
3.4.2	Ensaio Mecânico Sob Flexão	33
3.4.3	Morfologia da Superfície de Fratura dos Compósitos	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	FIBRAS DE PET.....	34

4.1.1	Densidade.....	34
4.1.2	Teor de Umidade.....	35
4.1.3	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	35
4.1.4	Termogravimetria (TGA).....	37
4.1.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	38
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS.....	39
4.2.1	Resistência ao Impacto.....	39
4.2.2	Resistência Sob Flexão.....	39
4.3	MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DOS COMPÓSITOS.....	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

A presente monografia tem como tema o desenvolvimento e a avaliação de um compósito de matriz de poliéster reforçado com fibras sintéticas de politereftalato de etileno (PET) oriundas de resíduos industriais.

Os materiais compósitos vem sendo cada vez mais utilizados em diversos segmentos da nossa sociedade, são inúmeras as aplicações possíveis ao se utilizar um material compósito, visto que esta classe de materiais apresenta propriedades especiais, que dependem diretamente dos seus componentes. Na construção civil, os materiais compósitos têm ganhado cada vez mais espaço, tendo um crescimento de forma exponencial no seu emprego em diversas aplicações, isto devido as vantagens quanto a redução de peso, o menor custo ou a maior resistência à corrosão quando comparados com os materiais tradicionais utilizados nesta área (CARVALHO, 2015).

Os materiais compósitos são constituídos de dois ou mais componentes, presentes em fases distintas, combinadas em um nível macroscópico, denominados de matriz e reforço. As propriedades mecânicas de um compósito são superiores quando comparadas às de uma fase atuando isoladamente ou o seu custo é reduzido pelo preço inferior de uma das fases sem que haja o comprometimento de propriedades mecânicas relevantes no material e na aplicação ao qual será destinado (GOSS, 2010; LEVY NETO e PARDINI, 2016).

A estrutura e as características da zona de interface entre matriz/reforço exercem uma expressiva influência sobre as propriedades mecânicas obtidas nos materiais compósitos, visto que é por meio da interface que as cargas aplicadas na matriz são transferidas para os reforços presentes. É através da melhoria da adesão interfacial, que ocorre um aumento da transferência das tensões aplicadas na matriz para as cargas, sejam estas em forma de fibras ou de partículas, o que promove o aumento da resistência à tração e módulo de elasticidade, dentre outras propriedades mecânicas almejadas nos materiais compósitos (RABELLO, 2009).

Diversos fatores tem tornado cada vez mais atrativos a utilização de compósitos sintéticos poliméricos reforçados com fibras no lugar de materiais de construção convencionais, dentre estes, vale destacar a maior resistência e rigidez em relação à densidade específica do material; maior resistência à fadiga e capacidade de absorção de energia de impacto; melhor resistência a corrosão, fogo, ácidos e ambientes agressivos; maior vida útil e menores custos de ciclo de vida; e não condutividade e baixa toxicidade (DITTENBER, 2012).

Cada vez mais existe a necessidade de se discutir sobre as políticas de gestão de resíduos dos materiais utilizados na indústria em geral, onde a maior vertente atual desta discussão é voltada ao desenvolvimento sustentável. Para que seja dada continuidade no processo de

desenvolvimento industrial, é necessário, por outro lado, racionalizar o consumo, optando por soluções e produtos mais sustentáveis no seu ciclo de vida e de produção. A utilização de reforços, oriundos de resíduos industriais, em materiais compósitos é uma solução ambientalmente favorável nesse cenário, visto que o emprego destes resíduos como reforço, além de ajudar na redução da quantidade de material base demandado para a produção de uma mesma peça, destina, de forma adequada, a uma nova aplicação um material que seria descartado pela indústria (LEMOS e MARTINS, 2014).

Avanços na engenharia civil se mostram imprescindíveis no século XXI visto que se constrói da mesma forma há décadas e a necessidade de novas técnicas construtivas que favoreçam uma diminuição nos custos e na poluição, além de garantir conforto ao usuário, propicia um aumento no número de pesquisas que possibilitem o desenvolvimento da construção (LIN *et al*, 2020). Neste sentido, verifica-se que muitos desenvolvimentos para a construção civil envolvem a engenharia de materiais no intuito de inserir materiais mais leves, menos poluentes, renováveis ou menos agressivos ao meio ambiente na execução de empreendimentos. A classe de material que melhor pode se adequar aos requisitos desejados a muitos produtos para construção civil são os compósitos.

Neste contexto, o uso de compósitos na construção civil pode satisfazer uma demanda da sociedade pela utilização de recursos renováveis. Sendo assim, é importante buscar alternativas de fibras como reforços para a produção de materiais, que atendam aos requisitos técnicos da aplicação sugerida nesta proposta. Desta forma, certos resíduos da indústria têxtil, como as fibras sintéticas de politereftalato de etileno (PET), podem ser aplicadas como reforços em matrizes poliméricas de compósitos que serão aplicados na construção civil.

Com isso, esta pesquisa busca solucionar as seguintes questões: É possível utilizar a fibra de PET oriunda de um resíduo da industrial como reforço em um compósito polimérico? Qual o nível de compatibilidade interfacial entre as fibras de PET e a matriz de poliéster? Quais as propriedades dinâmico-mecânicas obtidas no compósito de poliéster reforçado com fibras de PET?

As seguintes hipóteses foram levantadas para a concepção desta monografia: A fibra de PET pode ser incorporada como um reforço efetivo em compósitos de matriz de poliéster. A obtenção de um compósito de poliéster reforçado com um resíduo industrial deve contribuir para o desenvolvimento de novos materiais com caráter sustentável. É possível desenvolver um novo produto voltado para a indústria da construção através do compósito de poliéster reforçado com as fibras de PET.

Considerando este contexto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas de um compósito de matriz de poliéster reforçado com fibras de politereftalato de etileno (PET). Este objetivo é desdobrado nos seguintes objetivos específicos: 1. Caracterizar o resíduo de fibra de PET que será utilizado como reforço no compósito. 2. Avaliar o efeito da concentração de fibras de PET nas propriedades mecânicas dos compósitos. 3. Analisar a zona de interface formada entre a matriz de poliéster e o reforço das fibras de PET no compósito.

Para tanto, aborda-se, no capítulo 1, a introdução de conceitos-chaves sobre os materiais compósitos, o potencial da aplicação desta classe de materiais na construção civil e a importância da gestão sustentável dos resíduos gerados pela indústria, além de abordar as hipóteses e os objetivos definidos para esta pesquisa.

No capítulo 2, trata-se de definir as teorias fundamentais que foram consultadas para elaboração desta pesquisa, abordando desde os aspectos históricos dos materiais compósitos, aos tipos de classificação desta classe de materiais, até a descrição da função e do comportamento de cada constituinte do compósito. Nesta seção constam os principais autores que foram utilizados como fonte bibliográfica desta pesquisa.

No capítulo 3, são descritos os materiais utilizados nesta pesquisa e detalhada a metodologia que foi aplicada na sua execução, discorrendo sobre as técnicas de caracterização utilizadas nas fibras de PET, o modo de obtenção dos corpos de prova, a técnica de fabricação dos compósitos e os ensaios mecânicos que os compósitos foram submetidos.

No capítulo 4, são exibidos e avaliados os resultados dos ensaios de densidade, umidade, calorimetria exploratória diferencial, termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura das fibras de PET. Além disso, também são apresentadas e discutidas as propriedades mecânicas dos compósitos e por fim é realizada uma análise morfológica da superfície de fratura dos compósitos.

No capítulo 5, são feitas as considerações finais sobre a utilização das fibras de PET como reforço em compósitos poliméricos, abordando o seu potencial de reforço em uma resina de poliéster e a contribuição sustentável do desenvolvimento deste compósito, que impacta na diminuição da geração de um resíduo industrial através da reutilização das fibras de PET.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras vem sendo utilizados em aplicações de engenharia desde a primeira década do século XX, sendo que a partir da década de 40 a demanda por estes materiais cresceu significativamente devido à sua larga utilização pela indústria ligada ao setor militar. Em seguida, outros segmentos da indústria de bens de consumo também começaram a aumentar sua demanda por materiais poliméricos reforçados, pois estes já se apresentavam com um preço atrativo (GUTIÉRREZ, 2014).

Nos últimos anos vem se buscando cada vez mais estudar a minimização ou reaproveitamento de resíduos sólidos gerados em diversos processos industriais, pois através desses estudos é possível transformar um resíduo em matéria-prima de um novo produto. Uma boa estratégia de sustentabilidade que vem sendo adotada é aplicar os resíduos das indústrias têxteis como reforço em compósitos poliméricos, visto que a aplicação destas fibras pode estar atrelada a um baixo custo, redução da geração de resíduos, aumento da eficácia de aproveitamento de insumo da cadeia produtiva, boas propriedades térmicas e boas propriedades mecânicas (DOS SANTOS, SYDENSTRICKER e AMICO, 2006).

Os primeiros compósitos reforçados com fibras sintéticas, surgem por volta do século XIX, logo após a descoberta do primeiro polímero, o fenol-formaldeído. Este polímero foi utilizado como matriz e reforçado com fibras de linho para fazer baquelite, que é muito empregado em equipamentos elétricos. Os parâmetros de exigência dos materiais comuns mudaram de acordo com o avanço tecnológico, o que naturalmente influenciou diretamente o desenvolvimento de compósitos capazes de atender às novas demandas (VENTURA, 2009).

Os compósitos mais relevantes através do prisma tecnológico são aqueles cuja fase dispersa está presente na forma de fibra. Majoritariamente, os compósitos são desenvolvidos buscando uma melhoria das propriedades mecânicas do material, como a rigidez, resistência e tenacidade, em certas aplicações mais específicas, outras propriedades como a resistência a ambientes abrasivos e a altas temperaturas pode se tornar um fator relevante. Portanto, a análise dos compósitos em geral é norteadada pela investigação das suas propriedades mecânicas (LOPES, 2017).

Atualmente, os materiais compósitos vêm se apresentando com protagonismo em diversos mercados, dentre estes, estudos recentes mostram que os setores com maior presença desta classe de materiais são o dos transportes e o da construção civil, onde juntos representam mais de 50% das aplicações dos materiais compósitos. Mesmo tendo originado as pesquisas e

impactado diretamente na origem dos materiais compósitos, o mercado aeroespacial e de aeronaves, representam apenas 0,8% das suas atuais aplicações (VENTURA, 2009).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os compósitos podem ser classificados e divididos entre naturais e sintéticos. Alguns exemplos de compósitos naturais que podem ser encontrados no corpo humano são a cartilagem, que é classificado como um compósito reforçado com partículas, e os ligamentos e tendões, que são classificados como compósitos reforçados com fibras contínuas (LEVY NETO e PARDINI, 2016). O concreto armado é um exemplo de um compósito sintético que vem sendo utilizado em larga escala desde o século XIX, esse material é formado através de uma massa cimentícia reforçada com britas, na forma de partículas, e com varas de aço, na forma de fibras (OLIVEIRA, 2014).

Dentre as classificações em geral, os compósitos podem ser separados em dois grandes grupos quanto ao tipo de reforço sob a forma de fibras ou em partículas. Os compósitos reforçados com partículas, podem ter esta segunda fase dispersa na forma de partículas grandes ou dispersão, e os compósitos reforçados com fibras, podem ter essa fase presente de diferentes modos na matriz, como fibras contínuas ou descontínuas (fibras curtas), alinhadas ou orientadas aleatoriamente (LEVY NETO e PARDINI, 2016). Além disso também existem os compósitos estruturais que são divididos em painéis sanduiches e compósitos laminares.

Os compósitos podem ser constituídos a partir de matrizes poliméricas, metálicas ou cerâmicas. A madeira é um exemplo de um compósito que ocorre espontaneamente na natureza, pois é formada por fibras de celulose flexíveis e resistentes, envoltas em lignina, que é um material de menor rigidez (SILVA, 2010). Desse modo, a Figura 1 apresenta um esquema de classificação dos materiais compósitos e a Figura 2 ilustra uma representação bidimensional segundo a classificação de cada tipo de reforço que pode ser utilizado nos compósitos, ambas embasadas nos estudos realizados por Ventura (2009).

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Compósitos são materiais constituídos por duas ou mais fases em escala macroscópica, obtidos através da mistura de dois ou mais materiais distintos, cujas propriedades mecânicas devem ser superiores às dos materiais constituintes. Para atingir as propriedades almejadas em um material compósito, cada elemento (matriz, reforço e interface) deve apresentar características apropriadas. Assim, as suas propriedades dependerão das características dos seus constituintes, da concentração relativa, das características da interface, da eficiência no processo de preparação e transformação, a fim de assegurar a melhor morfologia no compósito final (DANIEL, 1994; FAKIROV e BHATTACHARYYA, 2007).

Os compósitos no geral apresentam uma fase contínua, chamada de matriz, e uma fase dispersa, chamada de reforço, que em muitos casos é formada por fibras. A matriz tem como função no compósito, envolver a fase dispersa fixando a sua localização e orientação correta na macroestrutura do material, além de prover a sustentação do material atuando como meio de transferência de esforços para os reforços presentes. Além disso, a matriz é a maior barreira de resistência à propagação de trincas no compósito, pois esta fase, no geral, tem uma maior ductilidade que as fases dispersas dos reforços (GOSS, 2010).

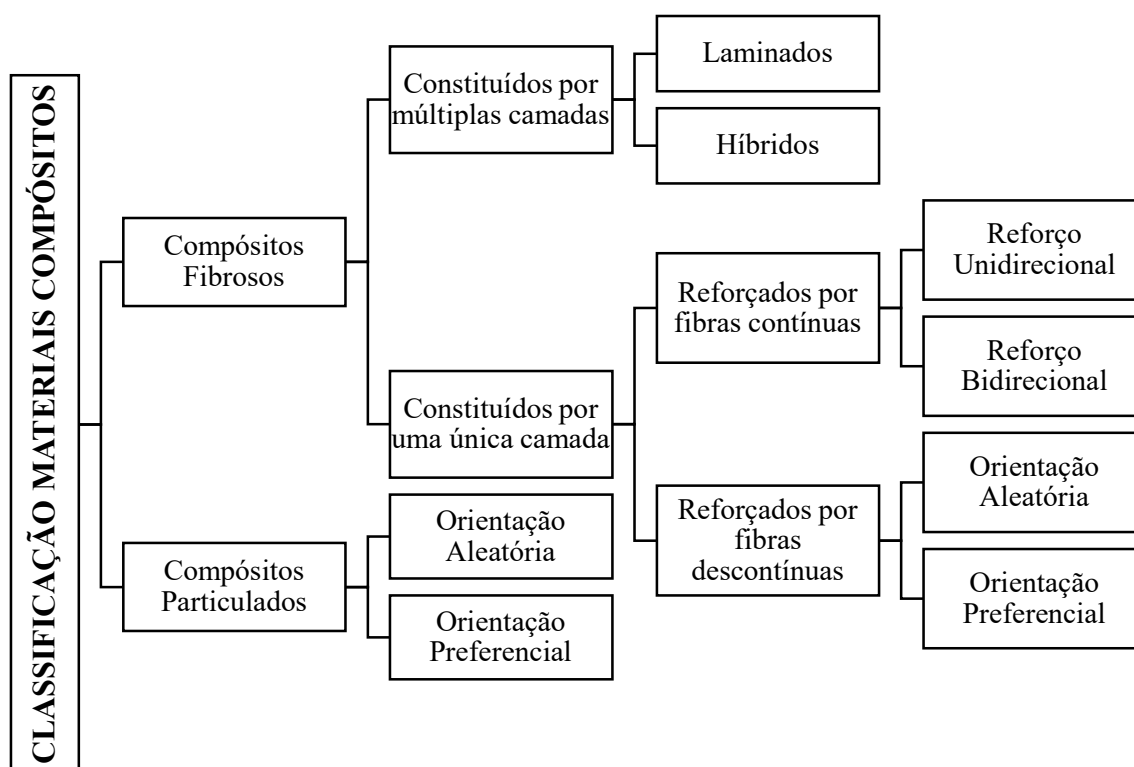


Figura 1 - Esquema de classificação materiais compósitos (baseado em VENTURA, 2009).

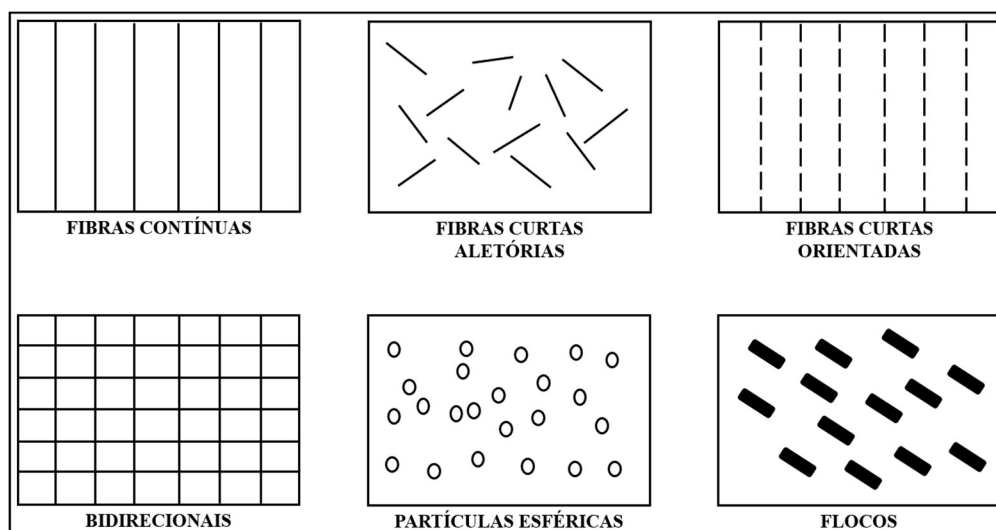


Figura 2 - Classificação dos compósitos segundo o tipo de reforço (baseado em VENTURA, 2009).

Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles onde a fase dispersa está na forma de uma fibra. Estes compósitos aliam alta resistência e rigidez ao baixo peso já que o mecanismo de reforço está associado a transferência de tensão da matriz para as fibras. As fibras sintéticas constituem um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica. Entre as fibras sintéticas utilizadas como reforço em compósitos, as fibras poliméricas têm ganhado uma significativa importância. A resistência mecânica destas fibras deve-se ao estiramento e orientação das cadeias ao longo do seu eixo, de forma que, após esses processos, exista fortes ligações covalentes interatômicas ao longo da cadeia polimérica (MARINUCCI, 2011).

No exemplo de um compósito reforçado com fibras alinhadas, onde este apresente uma matriz dúctil e uma fibra rígida e frágil, quando submetido a um carregamento gradativo na sua direção axial, através de um ensaio de tração, apresenta um comportamento característico quanto ao gráfico tensão-deformação resultante deste ensaio. A Figura 3 mostra o gráfico resultante deste ensaio.

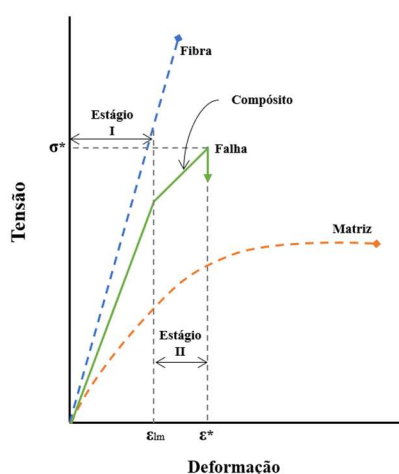


Figura 3 - Curva tensão-deformação esquemática para um compósito reforçado com fibras alinhadas (baseado em CALLISTER, 2002).

No Estágio I (linear) tanto a fibra quanto a matriz se deformam elasticamente. Devido as propriedades da matriz de um compósito deste tipo, há o escoamento desta fase enquanto se deforma plasticamente, enquanto as fibras continuam a se alongar elasticamente, até que o limite de resistência à tração das fibras seja atingido, que é representado pelo Estágio II do gráfico. O início da falha do compósito ocorre quando as fibras começam a fraturar, porém esta falha não se concretiza de forma catastrófica, pois as fibras não se rompem todas ao mesmo tempo (CALLISTER, 2002). Conforme Almeida (2012) apresenta no seu estudo, este comportamento não é muito observado na prática, devido à presença e surgimento de defeitos

na interface entre a matriz e as fibras, o que impede o ancoramento completo das fibras na matriz polimérica.

A maior facilidade de processamento da matriz e menor custo quando comparado com as fibras, são algumas das vantagens de se utilizar um material compósito no lugar de empregar apenas as fibras de forma isolada em uma aplicação. Os compósitos podem até mesmo apresentar propriedades inferiores que as de seu reforço, quando estes são mais atrativos comercialmente, devido a maior viabilidade econômica ou produtiva de aplicação que é bem mais oportuno que utilizar somente os reforços, sem estarem envolvidos em nenhuma matriz (VIRINO, 2018).

2.3.1 Interface matriz-reforço

O nível de influência do reforço efetivo das fibras nas propriedades finais dos compósitos está diretamente ligado às propriedades mecânicas das fibras, aos tipos de fibras, contínuas ou descontínuas, a orientação das fibras no compósito, alinhadas ou aleatórias, a fração volumétrica das fibras, ao tipo de processamento utilizado na produção do compósito e a interface fibra/matriz. Um fator essencial para se obter compósitos com boas propriedades mecânicas é a interface, onde em geral é almejada uma força elevada de ligação da fibra na matriz, garantindo assim uma fixação ideal do reforço no compósito (ALMEIDA, 2012).

A interface entre um reforço e uma matriz pode ser definida como a superfície entre os dois constituintes, por meio da qual ocorre uma descontinuidade. A justificativa pela qual a interface em um compósito é de grande importância é que a área da superfície interna ocupada pela interface é bastante extensa, mesmo em baixas razões volumétrica de fibras incorporadas. Além disso, a interface tem a função de transferir a carga aplicada na matriz polimérica para as fibras. No caso de um compósito especificamente reforçado com fibras, a interface ou zona interfacial consiste em camadas próximas à superfície da fibra, entre a matriz e qualquer camada de material existente entre essas superfícies (CHAWLA, 2012).

Durante a etapa de seleção de fibras como reforço em compósitos, deve-se levar em consideração alguns fatores intrínsecos a fibra, dentre estes, a molhabilidade e compatibilidade com a matriz polimérica está intimamente ligado as características de interface que serão obtidas no compósito. Existe a possibilidade de haver uma baixa compatibilidade entre a fibra e a matriz polimérica, quando isto ocorre há uma baixa interação na zona interfacial do compósito. Nesse caso, pode-se fazer o uso de um agente compatibilizante afim de aumentar a molhabilidade do polímero nas fibras e melhorar a adesão entre as fases constituintes do compósito (LEMOS e MARTINS, 2014). A Figura 4 mostra o exemplo de uma interface ideal plana e uma interface rugosa formada entre a matriz e uma fibra.

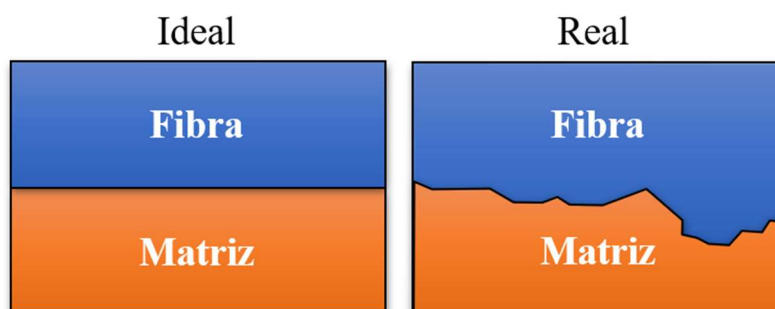


Figura 4 - Interface plana ideal e interface rugosa formada entre reforço/matriz (baseado em CHAWLA, 2012).

Geralmente, a interface formada entre a fibra e a matriz polimérica será moldada seguindo o mesmo perfil de rugosidade da fibra, como visto na parte real da Figura 4. Em compósitos de matriz polimérica, uma boa compatibilidade no nível molecular entre a fibra e a matriz gera a formação de forças intermoleculares na zona interfacial, podendo causar ou não uma ligação química entre os constituintes. Para obter uma boa interação entre a fibra e a matriz polimérica, deve haver um baixo ângulo de contato da matriz na forma líquida sobre a fibra. Entretanto, apenas uma boa molhabilidade da fibra não garante o seu ancoramento ideal no compósito, pois pode existir uma fraca força de ligação na interface como a do tipo Van Der Waals. Portanto, um baixo ângulo de contato, por si só, não é uma condição suficiente para garantir uma boa interface no compósito (CHAWLA, 2012).

2.4 MATRIZ

Os compósitos são materiais que podem ser constituídos com diferentes tipos de matrizes, como está representado na Figura 5 o compósito pode ser de matriz polimérica, matriz metálica ou de matriz cerâmica (VENTURA, 2009). A matriz é a fase contínua de um compósito e é o elemento fundamental que confere estrutura ao material preenchendo os espaços vazios que ficam entre os reforços e os mantêm fixos nas suas posições. Os objetivos desta fase é manter a coesão das fibras, proteger as fibras do meio envolvente, distribuir as cargas aplicadas pelas fibras e redistribuir as cargas pelas fibras remanescentes em casos de ruptura (VEIGA, 2014; ALMEIDA, 2012). O estudo dos materiais compósitos de matriz polimérica serão aprofundados neste trabalho, visto que, esta foi utilizada no contexto desta pesquisa.

O compósito constituído por uma matriz polimérica é formado, essencialmente, por uma resina e um reforço. Os compósitos poliméricos podem ser os de matriz termorrígida ou de matriz termoplástica. A diferença entre estes dois tipos de matrizes está no comportamento quando estas são aquecidas, onde os termoplásticos são polímeros que ao serem submetidos a ação da temperatura, estes se tornam fluidos e podem ser moldados diversas vezes, voltando a

solidificar quando é retirado o efeito da temperatura, enquanto os termorrígidos não são capazes de reproduzir esse comportamento após a cura, devido a formação de ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares do polímero (LEÃO, 2012).

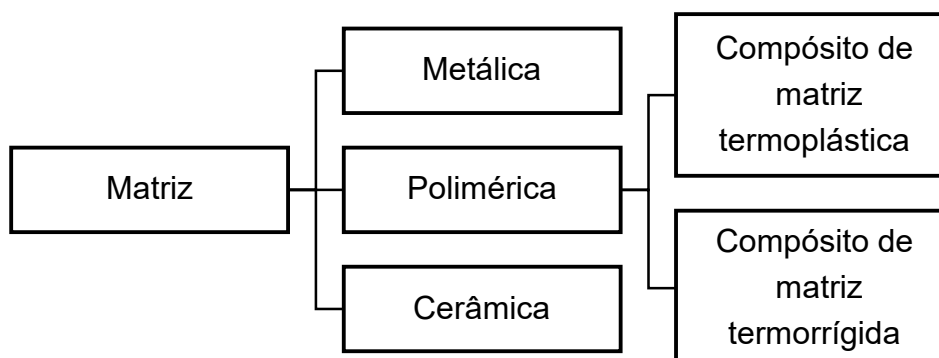


Figura 5 - Tipos de matrizes dos materiais compósitos (baseado em VENTURA, 2009).

As resinas termorrígidas ao serem submetidas ao processamento, frequentemente se faz necessário realizar a mistura de dois ou três componentes, que são a resina polimérica, o catalizador e por vezes, o acelerador. Após a mistura destes componentes na proporção adequada, ocorre a polimerização e é formada uma estrutura tridimensional rígida, este processo é denominado de cura. A facilidade de impregnação do reforço na matriz, é a principal vantagem de se utilizar polímeros termorrígidos, uma vez que a viscosidade que esse tipo de resina apresenta antes da cura, é muito mais baixa que a dos termoplásticos. As resinas termorrígidas mais utilizadas para a fabricação de compósitos são os poliésteres insaturados, as resinas de viniléster e as resinas fenólicas (VEIGA, 2014).

2.4.1 Resina Poliéster Como Matriz Polimérica

As resinas de poliéster são muito utilizadas na produção de compósitos poliméricos por conseguirem conciliar boas características de desempenho com um baixo custo (MARINNUCCI, 2011). Este material apresenta boas propriedades mecânicas e uma ampla variedade de formulações, onde as resinas são constituídas de polímeros sintetizados por uma reação de polimerização por condensação em etapas, através de uma reação de esterificação entre ácidos orgânicos dicarboxílicos (anidrido maleico ou ftálico) e glicóis, sendo que após esta reação, há a formação das moléculas de cadeias longas lineares do polímero. O tipo de ácido utilizado na reação afeta diretamente as propriedades finais da resina, onde podem ser produzidos poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas. Quando pelo menos um dos constituintes principais da resina são insaturados, a resina de poliéster resultante da reação é insaturada (SILVA, 2010).

As resinas com uso mais frequente são as de poliéster insaturado, devido ao baixo custo, baixa viscosidade, a facilidade de processamento e boas propriedades mecânicas, elétricas e química, além de apresentar um tempo de cura rápido, pois o processo de cura tem início imediatamente após a adição de catalisadores. Esse processo de cura é composto por duas fases, na primeira a resina líquida é transformada em um material gelatinoso, atingindo o ponto de gel e na segunda fase ocorre o endurecimento final do material por meio de um processo exotérmico. A velocidade de reação está relacionada com a reatividade da resina, teor de acelerador, teor de catalizador e das condições de temperatura (VEIGA, 2014).

A reação de cura da resina de poliéster acontece com a formação de um arranjo tridimensional nas ligações moleculares devido ao rompimento das insaturações presentes nos átomos de carbono dos ácidos insaturados. Devido a alta reatividade dessas insaturações, estas podem ser rompidas facilmente por radicais livres formados pelos catalisadores que são adicionados durante a produção de um compósito. Em sistemas de cura a frio, os iniciadores de cura mais utilizados são: peróxido de metil etil cetona (MEKP), peróxido de benzoila (BPO), hidroperóxido de cumeno (CHP) e o acetil acetona (AAP). Devido a esta reação ser de caráter exotérmico, há uma grande liberação de calor durante a cura, levando a massa polimérica a um aquecimento considerável, podendo provocar uma elevada retração volumétrica durante o processamento da matriz polimérica e gerar alterações na peça produzida (MARINUCCI, 2011).

2.5 REFORÇO

O reforço é o constituinte que tem o papel de garantir o bom desempenho do material compósito, pois este é o responsável por suportar em quase sua totalidade, as cargas que são aplicadas no compósito. O reforço é a fase dispersa presente no compósito, onde em geral são utilizados com o objetivo de aumentar a resistência e rigidez da matriz, entretanto, também podem ser utilizados para melhorar a resistência ao calor, corrosão e condutividade. Para que o reforço apresente vantagem para o compósito este deve ter maior resistência e rigidez que a matriz. Assim sendo, a formação de uma interface eficiente na adequação da rigidez do reforço com a ductilidade da matriz é primordial para que haja uma boa interação entre matriz e reforço (VENTURA, 2009; ALMEIDA, 2012).

A absorção de umidade pode ser um dos maiores problemas de processabilidade e aplicabilidade das fibras naturais nos compósitos. Alguns estudos mostram que a umidade e a granulometria das fibras naturais, devem ser rigidamente controladas, uma vez que produz descontinuidades de processos e peças com características inaceitáveis devido à presença de bolhas ou manchas superficiais causadas por processos degradativos (AZWA *et al*, 2013). Esse

problema geralmente não é muito notado quando se utiliza fibras sintéticas como reforço em compósitos, como por exemplo as fibras de vidro, que são muito utilizadas e não apresentam umidade, porém no caso das fibras de vidro, deve ser feita uma análise da interface entre a matriz e o reforço, a fim de evitar problemas de incompatibilidade (CAVALCANTE *et al*, 2010).

A absorção de umidade das fibras faz com que os compósitos falhem em condições úmidas através da rugosidade superficial por inchaço ou delaminação da fibra. A presença de umidade durante a fabricação leva a uma baixa capacidade de processo e baixo desempenho mecânico do compósito. Os compósitos poliméricos com fibras naturais são sensíveis à umidade e, com o tempo, a exposição à umidade poderá resultar na perda de suas funcionalidades. Sendo assim, a seleção adequada do tipo de fibra pode garantir uma maior resistência a umidade do compósito no geral (AZWA *et al*, 2013).

As fibras constituem uma classe muito importante de reforço devido ao aumento da resistência da matriz proporcionado pela sua incorporação, e desta forma interfere e destaca as propriedades almejadas pelas duas fases no compósito. No entanto, as fibras podem ter seu desempenho atenuado devido a fatores como o seu comprimento, sua forma, sua orientação no compósito, a composição das fibras e, inclusive, pelas propriedades mecânicas da matriz. O arranjo das fibras umas em relação às outras, o teor de fibras incorporadas e a sua distribuição afetam diretamente a resistência e outras características dos compósitos reforçados com fibras. As fibras contínuas usualmente são aplicadas de forma alinhada, enquanto as fibras descontínuas podem ser utilizadas de modo desalinhado, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas (VEIGA, 2014; VENTURA, 2009).

2.5.1 Fibras poliméricas

Os compósitos de fibras sintéticas obtidas a partir de polímeros, surgiram durante o século XIX após o desenvolvimento do primeiro polímero, o fenol-formaldeído. Este polímero foi reforçado com fibra de linho para produzir a baquelite, que é um material muito utilizado em equipamentos elétricos devido a sua alta resistência ao calor e isolamento térmico (VENTURA, 2009). Os compósitos de polímeros reforçados com fibras fazem parte de um cenário de amplas aplicações industriais e na construção civil. Eles são materiais que apresentam diversas vantagens na sua utilização, pois, essa classe permite obter propriedades especiais a partir da coalescência de distintos elementos constituintes, ao passo que essa junção resulta em vantagens para a aplicação do material (SABA *et al.*, 2015).

2.5.2 Fibras de PET Como Reforço

O politereftalato de etileno (PET) é um polímero termoplástico, que é gerado pela reação entre o etileno glicol e o ácido tereftálico. Seu principal uso é destinado a fabricação de embalagens para indústria de bebidas e a fabricação de fibras para tecelagem na indústria têxtil. O PET é um tipo de poliéster por possuir o grupo funcional éster na sua cadeia principal, e possui propriedades termoplásticas, logo, este pode ser reprocessado diversas vezes por meio de processos de transformação (ROMÃO *et al.*, 2009)

A aplicação das fibras de PET como reforço em componentes automotivos tem grande destaque devido às excelentes propriedades mecânicas e estabilidade térmica intrínsecas a fibra. O interesse acadêmico e industrial direcionou o desenvolvimento de extensos estudos sobre a cristalização do PET, que é induzida pela orientação das suas cadeias poliméricas, originando uma evolução estrutural de implicações práticas na otimização das propriedades das fibras. Além de sua forma cristalina triclínica, o PET forma uma fase mesomórfica, que possui uma estrutura intermediária entre a parte cristalina e amorfa do polímero (MISHRA e GUPTA, 2018).

Atualmente, os pesquisadores de materiais estão em busca de uma possível substituição de materiais convencionais, por materiais mais leves, em uma abordagem sustentável. Substitutos para a fibra de vidro como reforço em matrizes poliméricas vêm sendo investigados. Dentre uma gama de possibilidades, compósitos reforçados com fibras de PET apresentaram potencial para substituir as fibras de vidro de modo confiável em certas aplicações, especialmente quando a propriedade de absorção de energia é um requisito primordial para as solicitações de suporte de carga. Além disso, o uso de fios de PET mais leves que as fibras de vidro levam a estrutura geral do compósito a se tornar mais leve (MANJUNATH *et al.*, 2019).

2.6 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

Com o passar dos anos, a emissão de óxidos de carbono na atmosfera têm atingido níveis alarmantes. Essa situação preocupa e ganha atenção devido às consequências do acúmulo desses gases na atmosfera, que particularmente, são apontados como um dos principais agravantes do aquecimento global. Esse contexto levou ao desenvolvimento de diversas pesquisas sobre novos materiais com características mais sustentáveis e renováveis. Desse modo, os compósitos reforçados com fibras têxteis reutilizadas surgem como alternativa para a redução do impacto ambiental em um cenário em que diversas pesquisas buscam desenvolver novos materiais com propriedades aprimoradas atreladas a danos ambientais reduzidos (MANJUNATH *et al.*, 2019).

As indústrias em conjunto com as pesquisas acadêmicas vêm explorando novas maneiras de desenvolver produtos químicos menos nocivos ao meio ambiente e mais ecologicamente corretos para um vasto número de aplicações. As fibras naturais proporcionam essa possibilidade de entregar um maior valor agregado ao produto final em decorrência da diminuição de custos na sua fabricação, sustentabilidade e renovação, especialmente na indústria automotiva, além de causarem um menor impacto ambiental durante o processamento do material. Nessa conjuntura, as fibras oriundas de descartes industriais também apresentam vantagens similares a utilização das fibras naturais, uma vez que reduzem os níveis de descartes da indústria através do reaproveitamento desse resíduo, melhorando a sustentabilidade da cadeia produtiva (LEMOS e MARTINS, 2014).

O setor da construção civil em especial vem investindo no desenvolvimento de novos materiais que ajudem a reduzir o impacto ambiental impulsionado no conceito de economia circular. A economia circular oferece uma nova perspectiva para os ecossistemas industriais, incluindo materiais e produtos sendo realimentados na cadeia produtiva e de suprimentos como recursos, culminando na redução do consumo de recursos primários e na diminuição da geração de resíduos (BILAL *et al*, 2020).

O conceito de economia circular é norteado na reutilização de materiais e energia em cadeias produtivas fechadas, motivado na insustentabilidade do modelo econômico linear vigente que já está em seu limite (DA SILVA, 2019). Além de estar alinhado com o conceito de economia circular, o presente trabalho relaciona-se com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) criados pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, como por exemplo: ODS 9-Indústria, inovação e infraestrutura, que visa aumentar o nível de inovação e desenvolvimento da indústria; ODS 12-Consumo e produção responsáveis, que visa reduzir a geração de resíduos através da redução, reciclagem e reutilização; ODS 13-Ação contra a mudança global do clima, que visa diminuir os impactos ambientais causados no planeta e aumentar a preservação do meio ambiente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Após um levantamento prévio de requisitos e considerando critérios de sustentabilidade e viabilidade de produção os materiais foram selecionados para a produção dos compósitos.

3.1.1 Matriz Polimérica – Poliéster

Como matriz polimérica foi escolhida a Resina de Poliéster Insaturado CENTERPOL™ L-500, que é uma resina acelerada, tixotrópica e de baixa viscosidade. Esta resina é muito utilizada na fabricação de peças em compósitos por moldagem aberta, nos processos de *Hand Lay Up* e *Spray Up*. A ficha técnica fornecida pela fabricante Ashland (2013) apresenta as seguintes propriedades para essa resina curada sem reforço: 48 MPa de resistência à tração, 1,5% de alongamento, 70 MPa de resistência à flexão e 3,4 GPa de módulo de elasticidade. As vantagens de utilizar esta resina como matriz vão desde os seus requisitos técnicos e boa compatibilidade na agregação de reforços até ao seu baixo custo, o que facilita o acesso ao material e barateia o compósito a ser obtido.

O catalisador BRASNOX® DM-50, um peróxido de metil etil cetona (MEKP) em dimetilftalato, foi utilizado como agente de cura. A Resina de Poliéster Insaturado e o catalisador utilizados foram adquiridos na empresa CENTERGLASS Indústria e Comércio Resina e Fibras de Vidro Ltda.

3.1.2 Fibra Sintética – PET

A fibra de PET utilizada nesse estudo é oriunda de um resíduo industrial gerado durante o processo de fabricação de fios de PET para obtenção de tecidos utilizados para reforço na construção de pneus. A fibra se encontrava na forma de feixes com grande comprimento e foi cortada de forma manual com tesoura com um comprimento médio de $(1,10 \pm 0,36)$ cm. O material foi disponibilizado por uma unidade da multinacional Kordsa Global localizada no Polo Industrial de Camaçari na Bahia. A Figura 6 mostra uma foto das fibras de PET utilizadas.



Figura 6 - Fibra de PET proveniente da Kordsa (Autor).

3.2 MÉTODO

3.2.1 Obtenção do Molde de Silicone

Inicialmente, moldes de silicone foram confeccionados para a obtenção dos corpos de prova, eles foram fabricados a partir de amostras de referência com as dimensões requeridas pela norma de ensaios de resistência a tração ASTM D638-14 (2014). Em uma bandeja polimérica, Figura 7, foram depositadas as amostras de referência e sobre as mesmas foi vertida a resina de silicone para a formação do molde, respeitando o tempo de cura de 72h. A Figura 7 apresenta as etapas de preparação do molde e a Figura 8 mostra o molde final obtido.

Foi utilizado o silicone SILAEX SQ8328, que é um silicone líquido bicomponente de cura a frio para a confecção do molde. Este silicone apresenta uma baixa viscosidade, preenchendo com fidelidade os detalhes dos objetos a serem copiados e conferem assim um bom acabamento nas peças moldadas.

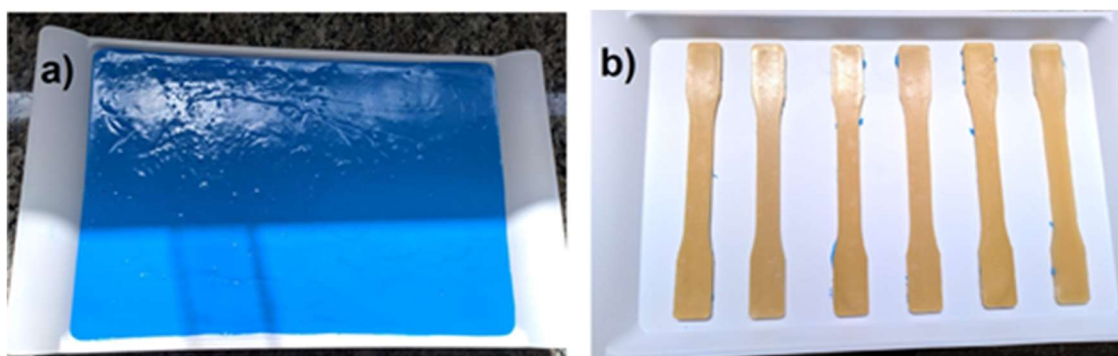


Figura 7 - Preparo do molde: a) silicone vertido; b) amostras de referência (Autor).

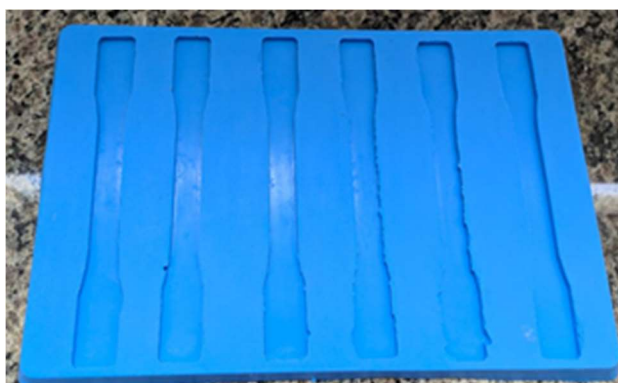


Figura 8 - Molde obtido para os corpos de prova dos compósitos (Autor).

3.2.2 Quantidade de Catalisador de Acordo com o Tempo de Cura

Foram realizados testes em laboratório, em temperatura ambiente, para definir a concentração ideal de catalisador a ser adicionado na resina e observados os tempos de cura conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempo de cura da resina para concentração de catalisador adicionado.

ENSAIO	CONCENTRAÇÃO (%v/v)	TEMPO DE CURA (min)
E1	1,00	>40
E2	2,00	40
E3	3,00	30
E4	5,00	12

Fonte: Autor

As proporções entre 1 e 3% de catalisador adicionado na resina levaram um tempo de cura muito acentuado, de mais de 30 minutos, o que tornaria a produção dos corpos de prova muito lenta, devido a disponibilidade de apenas 1 molde para fabricação dos corpos de prova. Na composição com 5% em volume de catalisador, foi observado que a resina apresentou um tempo de cura de 12 minutos, onde após isso os corpos de prova podiam ser desmoldados. Devido a isto, a proporção de 5% de catalisador e o tempo de cura de 12 minutos foram fixados para todos os corpos de prova obtidos.

3.2.3 Produção dos Corpos de Prova com 1, 3 e 5% de Fibras

As formulações iniciais dos compósitos foram discutidas e definidas em 1, 3 e 5% em massa de reforço (fibra de PET), o máximo de fibra utilizada foi 5% devido à limitações técnicas do molde, onde não se tornou viável utilizar formulações com maiores concentração de fibra, pois a espessura do molde dificultava a mistura adequada das fases. A Figura 9 mostra uma foto do molde contendo a resina pura durante a cura.



Figura 9 - Molde de silicone contendo os corpos de prova durante a cura (Autor).

Foram obtidos corpos de prova em 4 diferentes composições: i) com a resina pura; ii) com 1% em massa de fibra de PET; iii) com 3% em massa da fibra de PET; e iv) com 5% em massa da fibra de PET. Estes corpos de prova foram fabricados para que através de ensaios mecânicos, de flexão e impacto, fosse possível determinar a influência do teor de fibras de PET nas propriedades mecânicas do compósito.

Para a produção dos corpos de prova dos compósitos, as fibras, em seus devidos teores para cada composição, foram depositadas manualmente, de forma aleatória, no interior do molde de silicone. Em seguida, foi adicionado o catalisador na resina em um béquer e realizada uma agitação na resina com o auxílio de um bastão de vidro. Por fim, a resina de poliéster já contendo o catalisador, foi adicionada no molde através de um fluxo laminar relativamente lento e controlado, de modo a permitir a impregnação da resina nas fibras e evitando a formação de vazios macroscópicos nos corpos de prova.

A Figura 10 mostra uma imagem com os primeiros corpos de prova que foram obtidos. Foi utilizado 5% em proporção volume/volume de catalisador na resina de poliéster. Em todas as composições, a resina teve um tempo de cura de 12 minutos antes de serem retiradas do molde. Os corpos de prova ficaram expostos ao ar durante 24h após a desmoldagem, para que os processos de cura da resina fossem finalizados por completo. Em seguida os corpos de prova foram separados, armazenados e catalogados de acordo com as composições.



Figura 10 - Corpos de prova de resina pura obtidos (Autor).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE PET

Neste trabalho, as fibras foram utilizadas como reforço em compósitos poliméricos. Sendo assim, as caracterizações abaixo descritas apresentam objetivos que podem auxiliar a entender o comportamento destas quando incorporadas a um polímero termofixo para a formação do compósito.

3.3.1 Densidade

As propriedades de compósitos podem ser influenciadas pela presença de vazios formados durante a mistura e conformação. Uma das maneiras para se medir a fração volumétrica de vazios consiste em, inicialmente, medir-se a densidade de amostras dos componentes, e a partir destes valores obter-se a fração volumétrica dos vazios, conforme descreve Levy Neto e Pardini (2016).

Sendo assim, neste trabalho, o método utilizado para determinar a densidade das fibras foi descrito por César *et al* (2004) e consiste em pesar aproximadamente 5,0 g de cada amostra e anotar a massa exata obtida com o auxílio de uma balança analítica. Foram utilizadas 5 provetas graduadas de 50 mL com erro associado de $\pm 0,05$ mL, onde com uma pisseta, foi colocado água destilada até a marca de 35 mL. Em seguida, foram introduzidas as fibras na proveta até que as mesmas ficassem completamente submersas, aguardou-se 3 minutos para que parte das bolhas presentes na água ascendessem e foi aferido o volume obtido. Com a medida dos volumes de cada amostra e suas respectivas massas, foi possível calcular a densidade das fibras através da Equação (1):

$$Densidade (g/cm^3) = \frac{Massa}{(Volume\ inicial - Volume\ final)} \quad (1)$$

3.3.2 Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade das fibras torna-se um parâmetro importante no desenvolvimento do compósito, tendo em vista que a presença de umidade nos constituintes pode acelerar a degradação por hidrólise da matriz, assim como dificultar a adesão fibra/polímero (DE PAOLI, 2008).

A avaliação da umidade foi realizada através da secagem em estufa por ser a mais utilizada industrialmente. As amostras de fibras de PET foram submetidas as temperaturas de 80, 90, 100 e 110 °C em uma Estufa com Circulação e Renovação de Ar modelo SL-102 da marca SOLAB. A umidade foi relacionada com a massa das amostras e a medição foi realizada a cada 60 minutos até estabilização da massa. As amostras, após serem retiradas da estufa, foram mantidas em dessecador para não absorver a umidade do ar. Para o cálculo da umidade foi utilizada a relação da equação (2):

$$Umidade (\%) = \frac{(Massa\ úmida - Massa\ seca)}{Massa\ úmida} \times 100\% \quad (2)$$

3.3.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As propriedades térmicas das fibras foram determinadas através da Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG). Estas técnicas permitem avaliar o efeito da temperatura nas fibras e, assim, avaliar se elas poderão interferir no sistema de cura da matriz. Além disso, tensões térmicas em compósitos são tensões ocultas na estrutura do material que podem afetar a resistência e o comportamento mecânico do material, provenientes da diferença entre os coeficientes de expansão térmica da fibra e da matriz (MARINUCCI, 2011).

A análise da fibra através do DSC foi realizada no SENAI CIMATEC em um equipamento da TA Instruments modelo Q10 e cadinho de alumínio sob atmosfera de nitrogênio com vazão de 50 mL/min. Os ensaios foram realizados em dois estágios: 1) aquecimento de 20 a 380 °C sob uma taxa de aquecimento constante de 10 °C/min; e 2) resfriamento até 20 °C. O estágio 1 foi realizado para analisar a etapa de temperatura de fusão, enquanto o estágio 2 foi utilizado a fim de verificar os eventos associados a cristalinidade das fibras.

3.3.4 Termogravimetria (TGA)

A análise Termogravimétrica (TGA) para avaliação da estabilidade térmica da fibra de PET foi realizada no SENAI CIMATEC através de uma termobalança da TA Instruments modelo Q10, com uma razão de aquecimento de 10 °C/min, atmosfera de nitrogênio com vazão do gás de 100 mL/min. Foi utilizado cadinho de platina e o ensaio foi realizado na faixa de temperatura de 25 a 800 °C.

3.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A adesão polímero/fibra é um dos principais fatores para determinação das propriedades mecânicas do compósito. A morfologia das fibras foi estudada neste trabalho visando avaliar a possibilidade de ancoramento mecânico, este método de adesão é diretamente influenciado pela superfície da fibra.

As análises morfológicas foram realizadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para tanto, inicialmente, as fibras de PET passaram por um processo de deposição de carbono na superfície, este procedimento foi executado no SENAI CIMATEC no equipamento da marca Denton Vacuum modelo Desk V com o equipamento auxiliar Carbon Yarn Accessor, também da Denton Vacuum. A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em um equipamento da marca Jeol e modelo JSM-6510 LV.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

Para avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos com as diferentes formulações de fibras, foram realizados ensaios mecânicos sob flexão e de resistência ao impacto na resina pura e nos compósitos obtidos reforçados com as fibras de PET. Estes ensaios mecânicos foram selecionados para avaliar a compatibilidade das fibras de PET com a matriz de poliéster utilizada nos compósitos, além de nortear a identificação das composições de fibras que apresentem as melhores propriedades.

3.4.1 Ensaio Mecânico de Resistência ao Impacto

Os ensaios mecânicos de resistência ao impacto foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do SENAI CIMATEC, localizado na cidade de Salvador – BA, em uma

máquina Instron, modelo CEAST 9050, com martelo de 2,7 J e configuração IZOD, sem entalhe, seguindo a norma ASTM D4812.

3.4.2 Ensaio Mecânico Sob Flexão

Os ensaios mecânicos de resistência à flexão em 3 pontos também foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do SENAI CIMATEC, em uma máquina universal de ensaios Emic Modelo DL 2000, a aquisição e tratamento dos dados foi feita através de Software Tesc, seguindo a norma ASTM D790-17. Através do ensaio de resistência à flexão, foi possível encontrar o Módulo de Elasticidade dos corpos de prova analisados.

3.4.3 Morfologia da Superfície de Fratura dos Compósitos

A superfície de fratura dos corpos de prova submetidos a impacto foi utilizada para análise morfológica. As amostras passaram por um processo de deposição de carbono na superfície, para que fosse possível executar a análise no MEV, este procedimento foi executado no SENAI CIMATEC no equipamento da marca Denton Vacuum modelo Desk V com o equipamento auxiliar Carbon Yarn Accessor, também da Denton Vacuum. A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em um equipamento da marca Jeol e modelo JSM-6510 LV.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será discutido os principais resultados da caracterização das fibras de PET, levando em conta a sua aplicação como reforço em compósitos de matriz polimérica de resina de poliéster. Além disso, será avaliado o comportamento mecânico dos compósitos obtidos com 1, 3 e 5% de fibras incorporadas na matriz em comparação com a resina pura, a fim de se ter um diagnóstico mais preciso do comportamento das fibras de PET como reforço nesses compósitos. Será discutido os teores de reforço que proporcionaram melhores propriedades mecânicas ao compósito, bem como no final será realizada uma análise da superfície de fratura dos compósitos, através de um microscópio eletrônico de varredura, com o objetivo de avaliar o nível de adesão entre a matriz e o reforço e também de identificar quais as características de interface foram obtidas no compósito de matriz de poliéster reforçado com as fibras de PET.

4.1 FIBRAS DE PET

4.1.1 Densidade

Os resultados obtidos através das medições de densidade, seguindo o método descrito por César et al (2004), de diferentes amostras da fibra de PET estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados obtidos no ensaio de densidade das fibras.

AMOSTRA	MASSA (g)	VOLUME (cm ³)	DENSIDADE (g.cm ⁻³)
A1	5,018	4,8	1,045
A2	5,044	4,9	1,029
A3	5,017	4,8	1,045
A4	5,053	4,9	1,031
A5	5,045	4,7	1,073

Fonte: Autor.

A partir da análise desse resultado, foi encontrado o valor médio da densidade das fibras de PET utilizadas, na faixa de $(1,045 \pm 0,007)$ g.cm⁻³. Estes valores apresentam uma certa desconformidade com outros encontrados na literatura, como no resultado obtido por Betioli (2003), onde o autor encontrou uma densidade de 1,331 g.cm⁻³ para as fibras de PET. Essa divergência pode ser justificada, em partes, devido a diferença de métodos adotados para realizar a medição do volume das fibras, uma vez que o autor utilizou um multiplicômetro, que consiste em um instrumento designado especificamente para determinar a verdadeira medida do volume de diferentes quantidades de materiais sólidos, enquanto o método adotado nesta pesquisa, utilizou apenas uma proveta graduada nesse procedimento, o que pode acarretar em um maior erro experimental podendo gerar essa divergência observada.

O resultado obtido para a densidade da fibra de PET mostra que essa fibra, quando comparada a fibra de vidro, que tem densidade de 2,54 g/cm³, resulta na formação de compósitos mais leves, sendo que o peso, por sua vez, é uma característica determinante em diversas aplicações (LEVY NETO e PARDINI, 2016).

4.1.2 Teor de Umidade

Visando conhecer as características higroscópicas das fibras previamente selecionadas para a produção dos compósitos foi elaborado um protocolo de secagem em estufa com circulação de ar e diferentes temperaturas, as curvas de secagem da fibra. Os dados obtidos experimentalmente auxiliaram na definição dos parâmetros de secagem das fibras antes da mistura com a matriz polimérica. A Tabela 3 apresenta a umidade das fibras em função da temperatura utilizada, após 4h na estufa. Como descrito anteriormente, as medições foram realizadas a cada 60 minutos.

Tabela 3 - Umidade das fibras de PET em função da temperatura do ensaio em estufa.

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C)	UMIDADE (%)
PET F1	80	1,36
PET F2	90	1,49
PET F3	100	2,01
PET F4	110	1,42

Fonte: Autor.

Como pode ser observado, as amostras de fibra sintética apresentaram valores de umidade baixos. A presença de umidade nas resinas de politereftalato de etileno (PET), polímero utilizado para obtenção da fibra sintética, é crítica apenas na sua forma fundida pois pode alterar especialmente a viscosidade intrínseca do polímero alterando as condições de conformação sob temperatura (FREIRE *et al*, 1998). Sendo assim, os constituintes foram utilizados sem secagem prévia a incorporação na matriz polimérica.

4.1.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Os resultados encontrados nas caracterizações térmica das fibras de PET estão alinhados com diversos resultados encontrados e já apresentados pela literatura por outros autores. A Figura 11 ilustra o termograma obtido por DSC para os dois estágios: aquecimento-resfriamento.

O PET tem uma temperatura de transição vítrea (T_g) em torno de 70 °C, onde a esta é apresentada no gráfico como uma mudança de linha de base (SABA *et al*, 2015). No entanto, a T_g não foi identificada na fibra utilizada, possivelmente isto ocorreu devido aos processos de estiramento que aos quais as fibras de PET são submetidas durante o seu processamento, onde

esse estiramento leva a uma elevação do grau de cristalinidade destas fibras e conseqüentemente ao não aparecimento da Tg devido a alta cristalinidade das fibras. Esse resultado foi embasado nos estudos elaborados por Haji e Rahbar (2012).

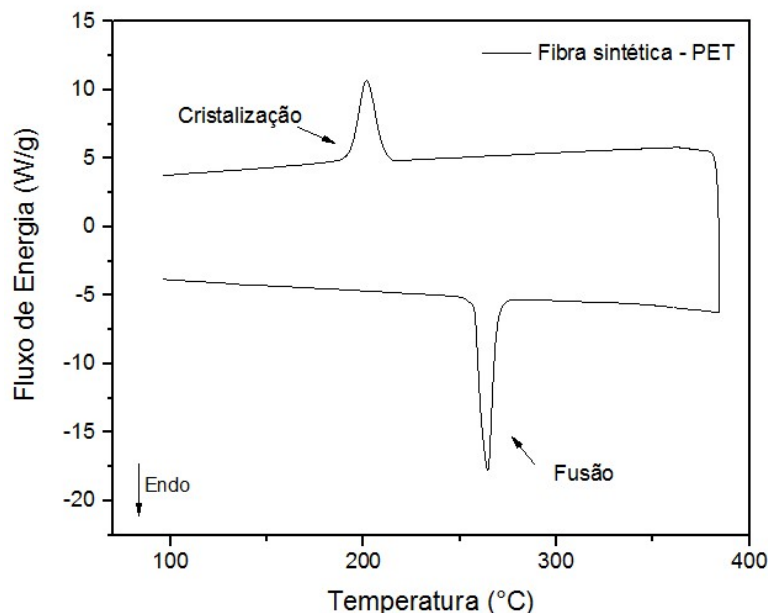


Figura 11 - Termograma DSC Fibra de PET (Autor).

São observados no termograma de DSC das amostras, que os valores obtidos para a Temperatura de fusão (T_f) das fibras de PET, onde a fusão da amostra se inicia em 193,99 °C e termina em 269,92 °C e a temperatura de fusão da amostra no máximo do pico do termograma foi de 252,04 °C. Estes valores estão condizentes com os apresentados na literatura por Betioli (2003).

Além disso, também foi possível avaliar o pico de cristalização das fibras de PET no termograma. Como a cristalização ocorre durante o ciclo de resfriamento, logo a temperatura inicial de cristalização é maior que a temperatura final. A temperatura de início da cristalização de acordo com o termograma é em 215,71 °C e a mesma termina na temperatura de 168,13 °C, sendo que a temperatura de cristalização no máximo do pico foi de 201,43 °C. Estes resultados também estão alinhados com os encontrados por Betioli (2003). A entalpia de cristalização dada pelo equipamento foi de 51,51 J/g.

4.1.4 Termogravimetria (TGA)

A curva termogravimétrica da fibra de PET é apresentada na Figura 12. Neste gráfico, pode ser observado na curva da derivada, a formação de pequenos picos até aproximadamente 100°C, sendo que estes podem estar relacionados com a perda de umidade da amostra. Além disso, isso pode justificar a alteração na Tg que impediu que a mesma fosse identificada através do DSC, uma vez que a água agiria como agente plastificante sobre as fibras. Contudo, a

estabilidade térmica da fibra de PET foi mantida até aproximadamente 325,44°C, a partir desta temperatura ela perde toda a sua massa em uma única etapa até 464,06°C.

Este resultado apresenta dados que estão de acordo com os resultados obtidos por Bannach *et al* (2011), onde nos resultados abordados pelos autores, a amostra de PET estudada não apresentou variação de massa até a temperatura de 350°C, quando se iniciou uma perda de massa da amostra que terminou em 510°C, na qual 88% da massa total da amostra foi perdida.

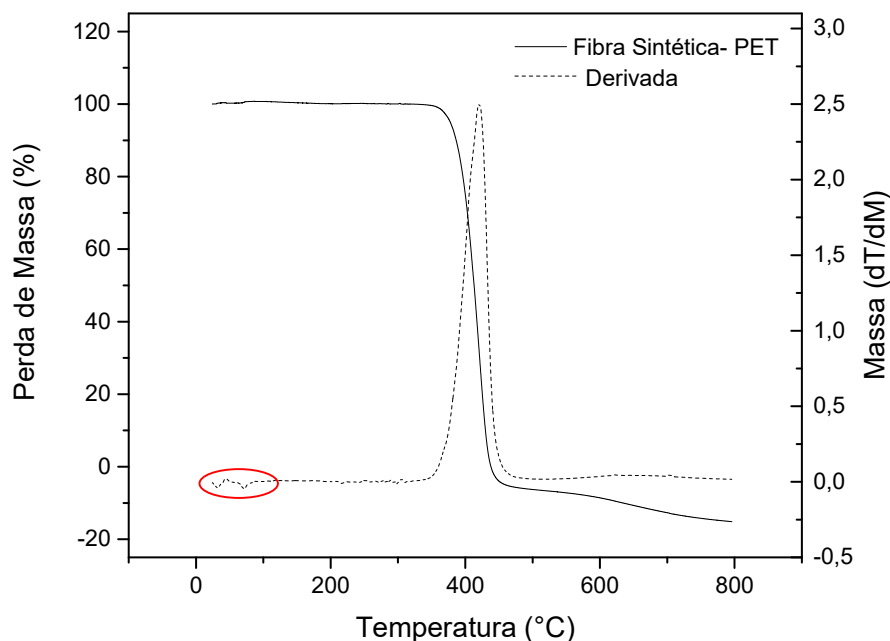


Figura 12 - Curva termogravimétrica da Fibra de PET (Autor).

4.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização morfológica das fibras de sintéticas de PET é mostrada Figura 13 através das imagens obtidas por MEV. As microfotografias obtidas para as fibras de PET evidenciaram que a textura superficial das fibras é lisa, porém estas fibras apresentam, em certos pontos, pequenos defeitos superficiais. Assim como os resultados obtidos por Betioli (2003), a causa desses defeitos superficiais ou incrustações na superfície das fibras não foi determinada, sendo que estes defeitos podem ter sido originados durante o processo de obtenção das fibras ou em algum processo de secagem com a remoção de líquidos do interior destas fibras. Na Figura 13-c, onde a imagem com maior aumento foi obtida (700x), observa-se que as fibras utilizadas nessa pesquisa apresentam uma seção transversal circular, com um diâmetro entre 20 e 30 μm .

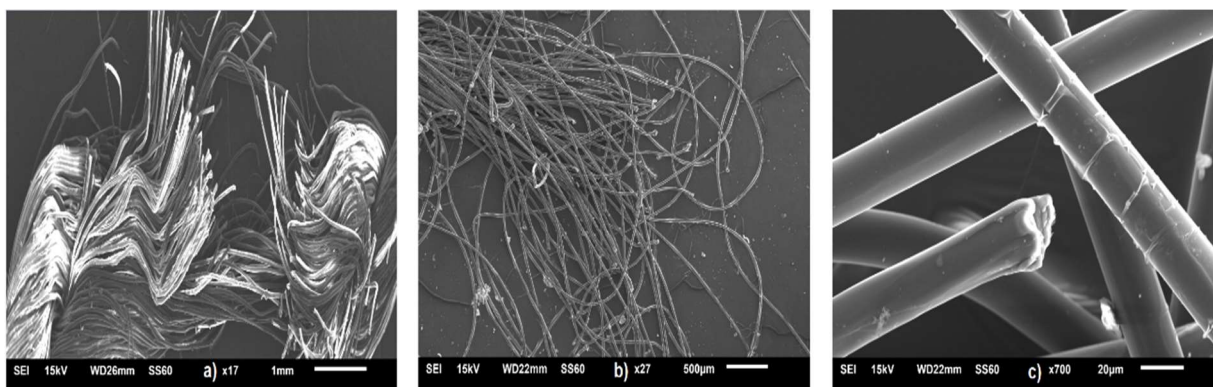


Figura 13- MEV da Fibra de PET aumento de: a) 17x; b) 27x; c) 700x (Autor).

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

4.2.1 Resistência ao Impacto

Foi verificado um efeito significativamente positivo nesta propriedade quando adicionada as fibras de PET como reforço na matriz polimérica. A Figura 14 mostra os valores médios de resistência ao impacto obtidos para os compósitos em função da adição de diferentes teores de fibras de PET.

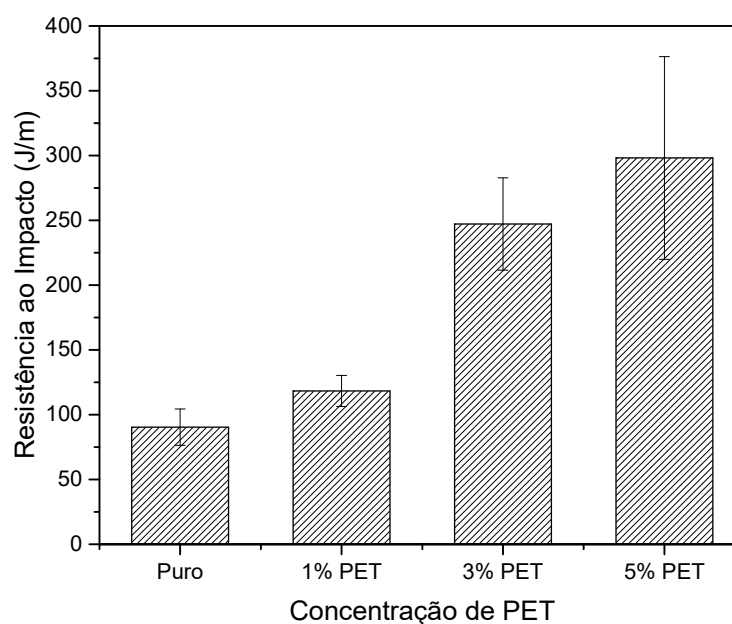


Figura 14 - Resistência ao Impacto de Compósitos com Fibra de PET (Autor).

A adição de 5% de fibra de PET resultou em um aumento de mais de 300% nesta propriedade, logo, este resultado indica que as fibras de PET adicionadas na matriz de poliéster, atuaram como intensificadores da tenacidade à fratura por impacto dos compósitos, devido ao aumento da resistência ao impacto provocados pela adição de fibras em comparação ao poliéster puro. Isto pode ser um indicativo que há uma boa compatibilidade na interface entre matriz de poliéster e as fibras de PET, uma vez que as estruturas químicas presentes na composição da matriz e do reforço, por serem de famílias semelhantes, apresentam uma boa afinidade.

Resultados semelhantes a esse foram obtidos por outros autores no estudo de compósitos de matriz de PP reforçados com fibras de PET, onde também foi observado um aumento da resistência ao impacto dos compósitos com o aumento do teor de fibras de PET incorporadas (ASGARI e MASOOMI, 2012).

4.2.2 Resistência Sob Flexão

As Figuras 15 e 16 mostram os resultados obtidos, respectivamente, dos valores médios de Módulo de Elasticidade e Resistência à Flexão encontrados para os compósitos reforçados com fibras de PET em função do teor de fibras utilizadas como reforço.

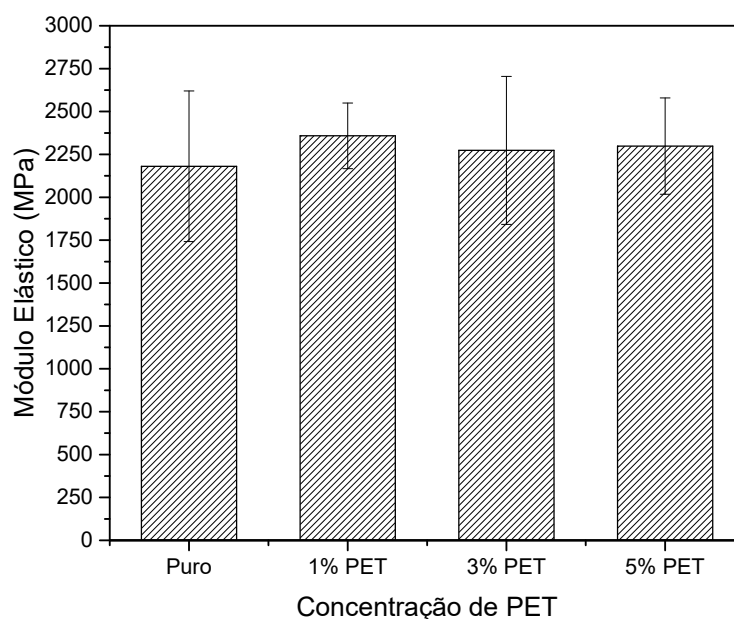


Figura 15 - Módulo Elástico de compósitos com Fibra de PET (Autor).

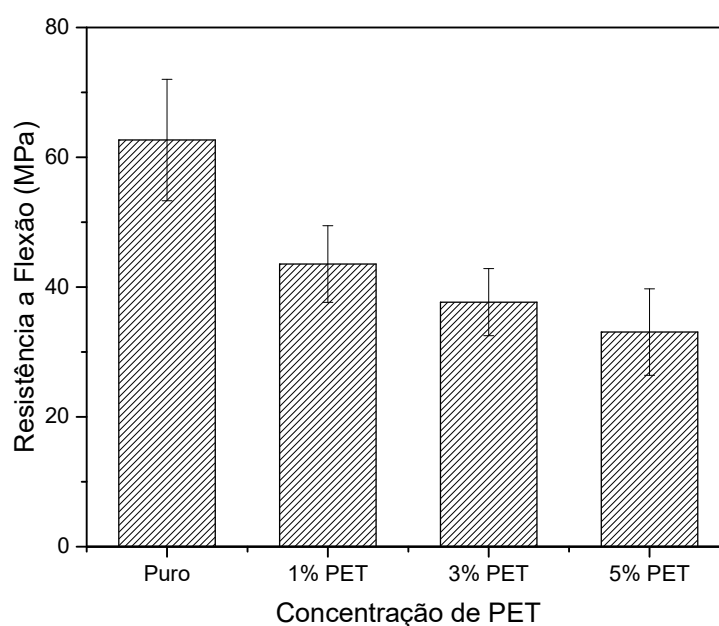


Figura 16 - Resistência a Flexão de compósitos com Fibra de PET (Autor).

O módulo elástico se manteve praticamente estável, ou seja, a fibra de PET não alterou a rigidez do material. A formulação contendo 1% de fibras apresentou o maior valor médio do Módulo Elástico dentre as amostras, que foi de 2,36 GPa.

No entanto, ao investigar os efeitos da adição de fibras de PET na resistência a flexão dos compósitos, foi possível observar que o aumento do teor de fibras adicionadas, reduziu a resistência a flexão. Isto indica que este comportamento ocorre possivelmente devido a presença de vazios ou a baixa adesão das fibras gerados pela sua introdução na matriz. Esses vazios tendem a agir como pontos concentradores de tensão no compósito, o que leva a uma falha e rompimento do compósito quando submetido a tensões menores que as de ruptura por flexão da matriz polimérica sem reforço.

4.3 MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DOS COMPÓSITOS

As superfícies de fratura dos compósitos foram avaliadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Através dessa técnica foi possível investigar a interface formada entre os constituintes dos compósitos e a distribuição da fibra na matriz. A interface é responsável pela transferência de solicitação mecânica entre a matriz e a fibra e pode ser influenciada por alguns fatores como afinidade química, ancoramento mecânico e processo de fabricação.

A Figura 17 mostra a microscopia da superfície de fratura de um corpo de prova de resina de poliéster puro, a fim de se identificar como se deu a fratura da resina pura, para posteriormente comparar com as imagens obtidas das superfícies de fratura dos compósitos.

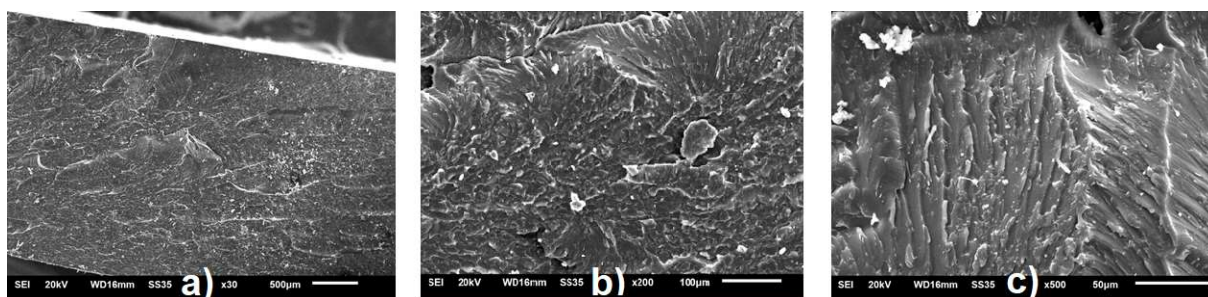


Figura 17 - Topografia da fratura de resina pura de poliéster aumento de: a) 30x; b) 200x; c) 500x (Autor).

Na Figura 17-a é possível observar características de uma fratura frágil nos corpos de prova da resina pura de poliéster, uma vez que a fratura ocorreu sem deformação plástica apreciável e produziu uma superfície de fratura relativamente plana, dados semelhantes foram encontrados por Da Rocha (2016). Este comportamento de fragilidade na fratura já era esperado, devido à resina de poliéster se tratar de uma matriz polimérica termofixa. A Figura 17-b mostra a formação de alguns defeitos na região de fratura, com a formação de alguns pequenos pontos desuniformes de arrancamento da resina. Algumas superfícies oriundas de

fraturas frágeis contêm linhas ou nervuras que são irradiadas da origem da trinca, como as nervuras que podem ser vistas na Figura 17-c, que indicam a direção de propagação da trinca que levou o material a ruptura além de corroborar com a caracterização de uma fratura do tipo frágil da resina de poliéster pura.

As forças de adesão que estão presentes na zona de interface entre a matriz polimérica e os reforços fibrosos de um compósito afetam diretamente na tensão de ruptura do compósito. Uma baixa eficiência na transferência de esforços entre a matriz polimérica e as fibras, oriundas de uma fraca força de adesão entre matriz/reforço, pode levar a uma falha prematura do compósito ou a uma atenuação das propriedades que poderiam ser obtidas nesse material (RZATKI e BARRA, 2014).

As Figuras 18, 19 e 20 mostram as topografias das regiões de fratura dos compósitos, respectivamente, contendo 1%, 3% e 5% de teor de fibras de PET incorporadas na matriz polimérica.

Na Figura 18-b é possível identificar que há uma baixa adesão entre a fibra/matriz, uma vez que é visível a formação de um vazio entre a fibra de PET e a matriz polimérica, esta baixa adesão poderia ser atenuada através de um tratamento das fibras de PET prévio a sua incorporação na matriz do compósito.

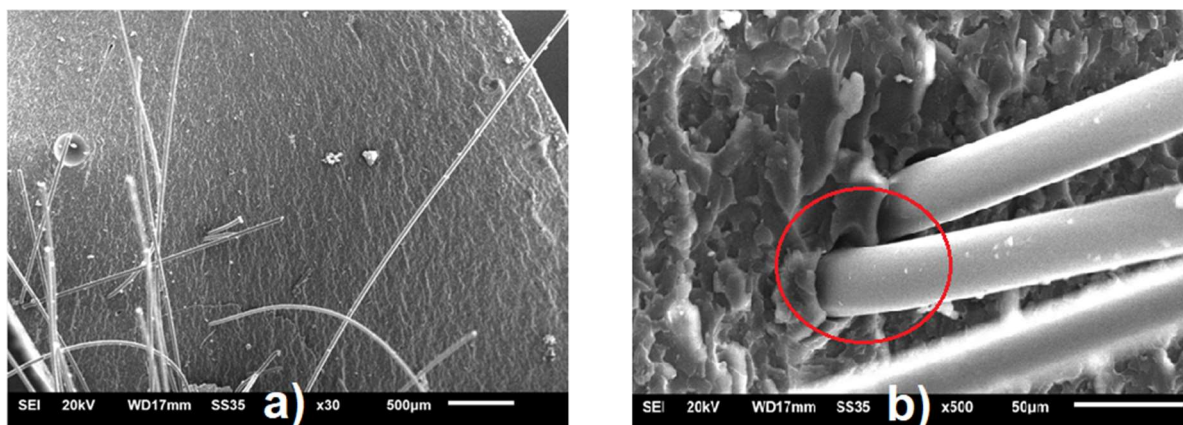


Figura 18 - Fratura compósito 1% Fibras de PET aumento de: a) 30x; b) 500x (Autor).

Na fratura do compósito contendo 3% de fibras de PET incorporadas é notório a partir da análise da Figura 19-b que houve o descolamento das fibras da matriz de poliéster, logo, novamente isso pode ocorrer devido à baixa força de adesão entre matriz/reforço no compósito. Os compósitos contendo 5% de fibras de PET incorporadas apresentaram a formação de feixes, que são vistos na Figura 20-b, logo isso indica que nesta composição houve uma má distribuição das fibras na matriz. Esta formação de feixes entre as fibras de PET pode agir como pontos concentradores de tensão no compósito, o que corrobora com o resultado obtido de menor

Resistência a Flexão dos compósitos contendo 5% de fibras quando comparados com as demais composições utilizadas.

Na Figura 20-c outro fator consoante que indica a baixa força de adesão entre as fibras de PET e a matriz de poliéster é a formação de muitos vazios, indicando que houve a formação de falhas e o arrancamento de muitas fibras da matriz durante a fratura. Assim como nos estudos elaborados por Rzatki e Barra (2014), o arrancamento e descolamento entre fibra e matriz geralmente é notado quando as forças de adesão entre fibras e matriz são fracas.

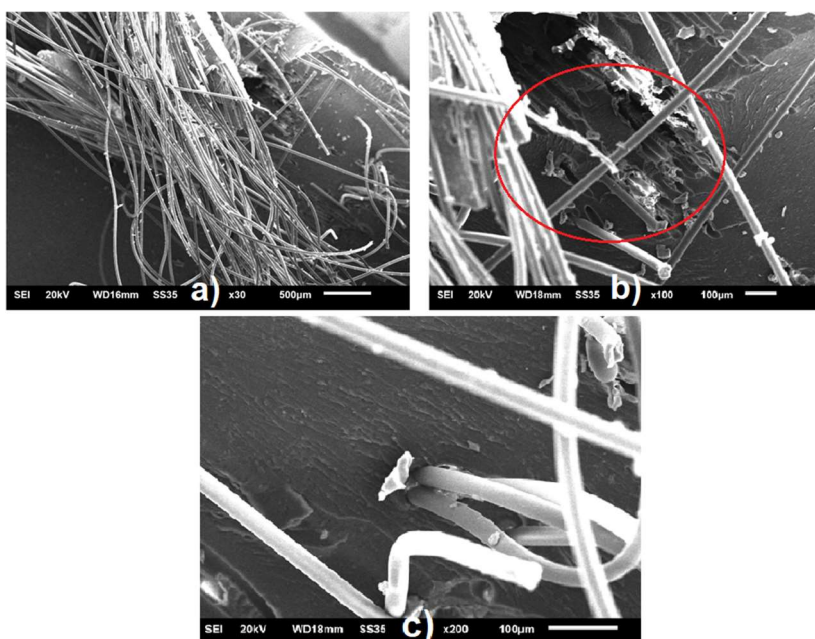


Figura 19 - Fratura compósito 3% Fibras de PET aumento de: a) 30x; b) 100x; c) 200x (Autor).

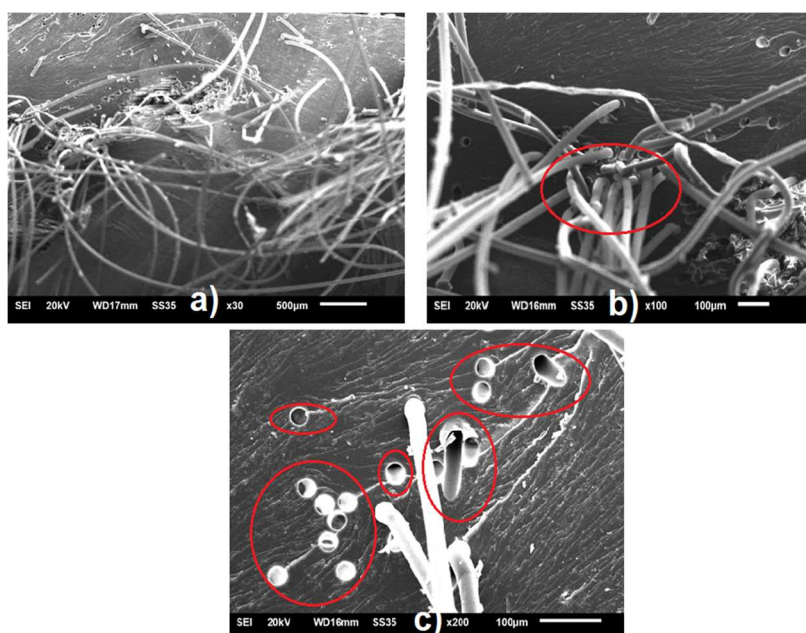


Figura 20 - Fratura compósito 5% Fibras de PET aumento de: a) 30x; b) 100x; c) 200x (Autor).

A forma de distribuição das fibras durante a conformação dos compósitos pode não ter sido adequada e isso possivelmente resultou em mais um fator que contribuiu com a diminuição da força de adesão entre os reforços e a matriz do compósito, portanto, novas metodologias de conformação, distribuição e orientação das fibras devem ser estudadas já que a fibra de PET apresentou um bom potencial como reforço quando incorporada na resina de poliéster.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das técnicas de caracterização utilizadas foi possível verificar previamente que as fibras de PET poderiam ser aplicadas na produção de compósitos poliméricos com matrizes termofixas. Foi constatado que a fibra de PET apresentou uma baixa umidade, não sendo necessário um processo de secagem prévio para incorporação dessas fibras em uma matriz polimérica. Esta fibra também apresentou uma boa estabilidade térmica, porém sua superfície lisa pode ter dificultado o seu ancoramento mecânico na matriz e, conseqüentemente, diminuído a adesão entre as fases. Foi demonstrado ainda que uma concentração de 5% de fibra de PET incorporadas na matriz de poliéster resultaram em um aumento significativo nos valores de resistência ao impacto dos compósitos.

A resistência a flexão dos compósitos reduziu na presença das fibras de PET, apresentando um comportamento inversamente proporcional ao teor de fibra nos compósitos. Este desempenho também pode estar associado a formação de vazios nos corpos de prova e a uma fraca adesão entre as fases. Todavia, mesmo com esta fraca adesão entre as fases, os resultados obtidos com os ensaios mecânicos dos compósitos demonstraram boas propriedades para a aplicação do material. Sendo assim, considerando o potencial de reforço apresentado pela fibra, parâmetros de processamento devem ser ajustados para melhoria das propriedades de flexão.

Por fim, os compósitos de matriz de poliéster reforçados com as fibras de PET apresentaram vantagens no desenvolvimento de um novo material, devido ao alto potencial de reforço que a fibra apresentou na resina de poliéster, visto que aliado a isso está a produção de um material em um contexto mais sustentável, em virtude de satisfazer uma demanda da sociedade que busca utilizar materiais compostos com matérias primas mais sustentáveis e também geram a diminuição de um resíduo industrial através da reutilização das fibras de PET, diminuindo assim o impacto ambiental que seria causado pelo seu descarte no meio ambiente. Deste modo, um potencial de aplicação para este compósito seria no desenvolvimento de um piso voltado para a indústria da construção civil.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Nuno Miguel Bastos de. **Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta**. 2012. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

ASGARI, Mohammad; MASOOMI, Mahmood. Thermal and impact study of PP/PET fibre composites compatibilized with glycidyl methacrylate and maleic anhydride. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 3, p. 1164-1170, 2012.

ASTM, ASTM. D638-14 Standard test method for tensile properties of plas-1010 tics. **ASTM International**, 2014.

AZWA, Z. N., YOUSIF, B. F., MANALO, A. C., & KARUNASENA, W. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. **Materials & Design**, 47, 424-442, 2013.

BANNACH, Gilbert et al. Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para o ensino de análise térmica. **Química Nova**, v. 34, n. 10, p. 1825-1829, 2011.

BETIOLI, Andrea Murillo. **Degradação de fibras de PET em materiais à base de cimento portland**. 2003. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BILAL, Muhammad et al. Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123250, 2020.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 5ª Edição. **Rio de Janeiro: LTC**, 2002.

CARVALHO, Renato Resende Moreira Baptista. **Degradação mecânica em compósitos de vidro/epóxico sujeitos a soluções cimentíficas**. 2015. 46 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.

CAVALCANTI, Wilma S.; DE LIMA, Antonio GB; CARVALHO, Laura H. de. Sorção de água em compósitos de poliéster insaturado reforçados com tecido de juta e juta/vidro modelagem, simulação e experimentação. **Polímeros**, v. 20, n. 1, p. 78-83, 2010.

CÉSAR, Janaína; DE PAOLI, Marco-Aurélio; DE ANDRADE, João Carlos. A determinação da densidade de sólidos e líquidos. **Revista Chemkeys**, n. 7, p. 1-8, 2004.

CHAWLA, Krishan Kumar. **Composite Materials: Science and Engineering**, 3ª Edição. **New York: Springer**, 2012.

DA ROCHA, Gabriel Bezerra Teixeira *et al.* Análise fractográfica em MEV–fratura dúctil x fratura frágil. **Ciência e Tecnologia**, p. 85. 2016.

DA SILVA, Valdenildo Pedro. Economia circular: Um novo valor para negócios sustentáveis. **RAE-Revista de Administração de Empresas**, v. 59, n. 3, p. 222, 2019.

DANIEL, Isaac M. et al. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford university press, 1994.

DE PAOLI, Marco Aurelio. **Degradação e estabilização de polímeros**, São Paulo: Artliber Editora, 2008.

DITTENBER, David B.; GANGARAO, Hota VS. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 8, p. 1419-1429, 2012.

DOS SANTOS, Alexandre M.; SYDENSTRICKER, Thais HD; AMICO, Sandro C. Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia. **9º Congresso Brasileiro de Polímeros**. Curitiba: Universidad Federal de Parana, 2006.

FAKIROV, S.; BHATTACHARYYA, D. Handbook of engineering biopolymers: homopolymers. **Blends, and Composites**”, Hanser Gardner USA, 2007.

FREIRE, Maria Teresa de A.; REYES, Felix GR; CASTLE, Laurence. Estabilidade térmica de embalagens de poli (tereftalato de etileno (PET): determinação de Oligômeros. **Polímeros**, v. 8, n. 1, p. 46-53, 1998.

GOSS, Thiago Marcon. **Panorama e perspectivas da indústria brasileira de compósitos**. 2010. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GUTIÉRREZ, Juan Carlos Horta et al. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros**, v. 24, n. 6, p. 711-719, 2014.

HAJI, Aminoddin; RAHBAR, Semnani Ruhollah. Structure evolution and mechanical behavior of poly (ethylene terephthalate) fibers drawn at different number of drawing stages. **Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly**, v. 18, n. 2, p. 233-243, 2012.

LEÃO, Rosineide Miranda. **Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

LEMOS, Alessandra Luiza de; MARTINS, Ricardo M. de. Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos à base de Poli (Ácido Lático) e fibras naturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 24, n. 2, p. 190-197, 2014.

LEVY NETO, Flávio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 2ed. São Paulo: Editora Blucher, 2016.

LIN, Alexander et al. Utilization of waste materials in a novel mortar–polymer laminar composite to be applied in construction 3D-printing. **Composite Structures**, v. 253, p. 112764, 2020.

LOPES, Bruno Leonardy Sousa. **Polímeros reforçados por fibras vegetais: um resumo sobre esses compósitos**. São Paulo: Blucher, 2017. 43 p.

MANJUNATH, R. N. *et al.* Comparative assessment of Static and Dynamic Mechanical Properties of Glass and PET fiber Reinforced Epoxy Composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 18, p. 4048-4057, 2019.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MISHRA, Brajesh; GUPTA, Mohit Kumar. Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 95-107, 2018.

OLIVEIRA, Nathalia Paula. **Concreto de cimento Portland reforçado com fibras de aço e de polipropileno**. 2014. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga – UNIFOR, Formiga, 2014.

RABELLO, Marcelo. **Aditivção de polímeros**, Ed. Artliber, São Paulo, 2009.

ROMÃO, Wanderson *et al.* Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009.

RZATKI, Felipe Darabas; BARRA, Guilherme Mariz de Oliveira. Efeito da modificação de superfície de fibras nas propriedades mecânicas de compósitos a base de poli (tereftalato de butileno) reforçado por fibras naturais inorgânicas. **Polímeros**, v. 24, n. 3, p. 344-350, 2014.

SABA, N. *et al.* Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review. **Construction and Building materials**, v. 76, p. 87-96, 2015.

SILVA, Humberto Sartori Pompeo da. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

VEIGA, Natália Arieira. **Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras de juta**. 2014. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2014.

VENTURA, Ana Mafalda FM. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.

VIRINO, Francisco Paulo Serpa. **Materiais compósitos na indústria da construção civil – cenário, desafios e oportunidades**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.