



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

GUILHERME BAPTISTELLA DE SÁ

**COMPÓSITOS DE REUSO DE FIBRA DE CARBONO E MATRIZ
TERMOPLÁSTICA: propriedades em tração e potencial substituição de
outras fontes não renováveis**

**São José dos Campos
2023**

GUILHERME BAPTISTELLA DE SÁ

**COMPÓSITOS DE REUSO DE FIBRA DE CARBONO E MATRIZ
TERMOPLÁSTICA: propriedades em tração e potencial substituição de
outras fontes não renováveis**

Trabalho de graduação apresentado como requisito parcial para
a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental
pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
-Unesp.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino

**São José dos Campos
2023**

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2023]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Baptistella de Sá, Guilherme
COMPÓSITOS DE REUSO DE FIBRA DE CARBONO E MATRIZ
TERMOPLÁSTICA: PROPRIEDADES EM TRAÇÃO E POTENCIAL
SUBSTITUIÇÃO DE OUTRAS FONTES NÃO RENOVÁVEIS / Guilherme Baptistella de Sá. -
São José dos Campos : [s.n.], 2023.
41 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Graduação em Engenharia Ambiental -
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia,
São José dos Campos, 2023.
Orientador: Marcos Yutaka Shiino.

1. Fibra de carbono. 2. PET. 3. Compósito. 4. Fibras longas. 5.
Propriedades em tração. I. Shiino, Marcos Yutaka, orient. II. Universidade
Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos
Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' -
Unesp. IV. Universidade Estadual Paulista (Unesp). V. Título.

GUILHERME BAPTISTELLA DE SÁ

**COMPÓSITOS DE REUSO DE FIBRA DE CARBONO E MATRIZ
TERMOPLÁSTICA: propriedades em tração e potencial substituição de
outras fontes não renováveis**

Trabalho de graduação apresentado como
requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Ambiental pela
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” -Unesp.

São José dos Campos, 11 de Maio de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino

Departamento de Engenharia Ambiental,
Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. Irineu Brito Junior

Departamento de Engenharia Ambiental,
Universidade Estadual Paulista

Prof. Dr. Luis Felipe de Paula Santos

Departamento de Materiais Avançados, Instituto
de Pesquisas Tecnológicas

DEDICATÓRIA

Este trabalho é todo dedicado aos meus pais e familiares, pois é graças ao seu esforço que hoje posso concluir o meu curso.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a conclusão deste trabalho de conclusão de curso. Primeiramente, agradeço ao meu orientador/-professor, Marcos Yutaka Shiino, pela sua orientação e dedicação em me guiar durante todo o processo. Seus conselhos, *feedbacks* e sugestões foram fundamentais para que eu pudesse desenvolver um trabalho de qualidade. Também agradeço aos meus familiares, amigos e a minha namorada pelo apoio incondicional, por me incentivarem a continuar e me ajudarem a superar os momentos de dificuldade.

Por fim, agradeço a UNESP por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da Unesp (1/2020 - PIBIC) e ao Processo FAPESP 2017/16160-8 que forneceram recursos financeiros para o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

BAPTISTELLA, Guilherme. **COMPÓSITOS DE REUSO DE FIBRA DE CARBONO E MATRIZ TERMOPLÁSTICA:** propriedades em tração e potencial substituição de outras fontes não renováveis. 2023. Trabalho de graduação (Bacharel em Engenharia Ambiental) Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2023.

A indústria de bens duráveis tem buscado materiais leves e com boas propriedades mecânicas que causam menor impacto ambiental, como elementos estruturais utilizados na indústria de energia e transporte. Os materiais compósitos tem suprido essas necessidades quando combinando fibras longas e matriz polimérica. No entanto, os compósitos necessitam de soluções tecnológicas para reuso e reciclagem durante e ao final do ciclo de vida. Para isso, esta pesquisa abrange parte do problema da geração de resíduos de fibra de carbono durante o processo de fabricação, insumo de maior utilização na área. A pesquisa foi voltada para o reuso de aparas de tecido em fibra de carbono, sobras da manufatura de compósitos, com matriz termoplástica de polietileno tereftalato (PET). Foi analisado o efeito da descontinuidade, tamanho e disposição das aparas de fibra de carbono no laminado final, por meio de ensaio de tração, e comparada com demais materiais poliméricos em termos de propriedade específica. Para isso, o laminado foi processado em prensa com platôs aquecidos, com empilhamento com sobreposição das descontinuidades, assim como a fração volumétrica controlada para garantir propriedades mecânicas desejadas em tração. Os resultados finais foram analisados em gráficos de propriedades em tração em função do número de descontinuidades e realizado um estudo comparativo sobre a viabilidade da substituição de materiais oriundos de fontes não renováveis em projetos de engenharia.

Palavras-chave: fibra de carbono; PET; compósito; fibras longas; propriedades em tração.

ABSTRACT

*BAPTISTELLA, Guilherme. **CARBON FIBER REUSE COMPOSITES AND THERMOPLASTIC MATRIX: tensile properties and potential replacement of other non-renewable sources.**2023. Undergraduate thesis (Environmental Engineering Degree) São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, São José dos Campos, 2023.*

The durable goods industry has been looking for lightweight materials with good mechanical properties that have less environmental impact, such as elements developed in the energy and transport industry. Composite materials have met these needs when combining long fibers and polymeric matrix. However, stored composites of technological solutions for reuse and recycling during and at the end of the life cycle. For this, this research covers part of the problem of carbon fiber waste generation during the manufacturing process, the most widely used input in the area. The research was focused on the reuse of fabric shavings in carbon fiber, leftovers from the manufacture of composites, with a thermoplastic matrix of polyethylene terephthalate (PET). The effect of the discontinuity, size and disposition of the carbon fiber chips in the final laminate was analyzed, through an interpretation test, and revealed with other polymeric materials in terms of specific property. For this, the laminate was processed in a press with heated plates, stacked with overlapping discontinuities, as well as controlled volumetric production to guarantee the desired mechanical properties in traction. The final results were analyzed in graphs of tensile properties as a function of the number of discontinuities and a comparative study was carried out on the feasibility of replacing materials originating from non-renewable sources in engineering projects.

Keywords: carbon fiber; PET; composite; long fibers; traction properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Compósitos com fibras curtas; (b) Compósitos com fibras longas	16
Figura 2 – Representação do dispositivo utilizado para conduzir ensaios tensão-deformação por tração.	21
Figura 3 – Tecido de fibra de carbono costurado em lâminas	23
Figura 4 – Análise do aumento do ângulo de contato em relação às tensões superficiais.	24
Figura 5 – Tecido de fibra de carbono costurado em lâminas	25
Figura 6 – Tecido de fibra de carbono costurado em lâminas	27
Figura 7 – Representação das camadas 1 e 4 do laminado.	28
Figura 8 – Cortes para elaboração do ensaio.	30
Figura 9 – Gráfico DCS - PET.	33
Figura 10 – Placas teste e referência.	34
Figura 11 – Seção transversal do compósito.	35
Figura 12 – Força versus deslocamento.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Propriedades dos materiais	20
Tabela 2	– Especificações do material utilizado.	24
Tabela 3	– Medidas dos retalhos da placa com comprimento crítico de 19,5 mm.	25
Tabela 4	– Medidas dos retalhos da placa com comprimento crítico de 39,5 mm.	26
Tabela 5	– Medidas dos retalhos da placa com comprimento crítico de 59,5 mm.	26
Tabela 6	– Processo experimental da moldagem por compressão a quente da placa de referência e 19,5mm.	28
Tabela 7	– Processo experimental da moldagem por compressão a quente da placa 39,5mm e 59,5mm.	29
Tabela 8	– Valores encontrados para os Ângulos de Contato (AC) da fibra.	32
Tabela 9	– Resultados do ensaio mecânico.	35
Tabela 10	– Resistência à tração de materiais de engenharia	37
Tabela 11	– Índice M	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Ângulo de Contato
CRFC	Compósito Reforçado com Fibra de Carbono
CRFV	Compósito Reforçado com Fibra de Vidro
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
ICT	Instituto de Ciência e Tecnologia
PC	Polycarbonato
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinila
PET	Polietileno tereftalato
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
PTFE	Politetrafluoretileno
PTB	Poli(tereftalato de butileno)
PPS	Poli(sulfeto de fenileno)
SJC	São José dos Campos

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ	Tensão superficial
σ	Tensão de aplicação da força
ρ	Massa específica
Δl	Deformação sofrida pelo corpo
ε	Deformação específica

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	14
2 – REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Compósitos reforçados com fibras	16
2.2 Propriedades mecânicas das fibras curtas.....	16
2.3 Matriz polimérica	17
2.4 Interface dos compósitos	17
2.5 Tração	18
2.6 Ensaio de tração.....	20
2.7 Seleção de materiais	21
3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	23
3.1 Caracterização da fibra	23
3.2 Caracterização do filme	24
3.3 Processamento	25
3.4 Análise via microscopia óptica.....	29
3.5 Ensaio mecânico	29
3.6 Estudo de caso: seleção de materiais.....	30
4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	32
4.1 Análise da fibra de carbono	32
4.2 Análise do PET.....	32
4.3 Processamento do compósito	33
4.4 Ensaio de tração.....	35
4.5 Estudo de caso	37
5 – CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A Fibra de Carbono (FC) possui características que atendem as necessidades para aplicação industrial, pois possuem baixa massa específica, alta resistência mecânica e módulo axial. Estas propriedades somada com a orientação das fibras ainda pode gerar um material com um alto valor de módulo de elasticidade (BEBER, 2003). Segundo Ventura (2009), os Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono (CRFC), apesar de possuir um preço elevado em comparação com outros materiais, possui propriedades como baixa densidade, resistência mecânica elevada e alto módulo axial que justificam o seu emprego em diversas áreas, com destaque a indústria aeroespacial.

No CRFC é importante a componente denominada fase matriz, que por sua vez, possui diversas funções em compósitos, primeiramente ela liga as fibras e distribui a tensão externa entre elas. Outra função importante é a proteção oferecida contra danos superficiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Além disso, é importante que a matriz seja um material dúctil, portanto justifica-se o uso de matrizes termoplásticas, por exemplo o polipropileno, que oferecem diversas vantagens que estimulam o seu uso para a obtenção de compósitos reforçados com fibra. Dentre elas destaca-se a sua capacidade de processamento em grandes volumes, suas características físicas permitem o reprocessamento do mesmo e o tempo para processar ou reprocessar matrizes termoplásticas é de curta duração (FREIRE; MONTEIRO; CYRINO, 2013).

As propriedades mecânicas dos compósitos são fundamentais para que se possa prever o comportamento do material em virtude da aplicação de uma carga remota. As propriedades mecânicas a serem obtidas dos materiais dependem de alguns fatores, como temperatura de ensaio, condição do ensaio e qualidade da amostra, que por sua vez, depende das condições de processamento e, conseqüentemente, da presença de defeitos (FREIRE; MONTEIRO; CYRINO, 2013). Outros dois fatores que interferem diretamente na resposta mecânica do compósito é a disposição da fibra (lâminas ou tecidos) e a fração volumétrica de matriz, levando em consideração, ainda, a orientação e o comprimento de cada fibra. Condições estas, que afetam diretamente o comportamento da distribuição de tensões devido às forças externas (NAKAMURA; WU, 2000).

Tanto a produção quanto a demanda de CRFC têm crescido, principalmente nos setores automotivos e aeroespacial. No Brasil, o consumo teve uma grande alta em 2012 quando o consumo atingiu 3,7 mil toneladas de fibra de carbono, colocando o Brasil em patamares elevados de demanda mundial. A justificativa para o aumento da sua utilização na indústria automotiva se deve a melhor eficiência, conseqüentemente, leva a diminuição da emissão de dióxido de carbono, uma vez que ao utilizar compósitos de fibra de carbono, diminui-se o peso dos componentes, dessa forma diminuindo-se a emissão de gases poluentes. Associado ao aumento da demanda, é a disposição crescente deste material como resíduo que é insatisfatório para o meio ambiente, visto que ele é descartado em aterros sanitários (ABDOU, 2015).

Um estudo realizado por Carberry (2008), indica que o processo de reciclagem de

CRFC utiliza apenas 5% da eletricidade necessária para se produzir novas fibras. Estima-se que, se das 900 toneladas de compósitos produzidas até o ano de 2015 para construção de aeronaves fossem recicladas e as fibras recuperadas, traria uma economia de energia para abastecer 175 mil casas durante um ano.

No contexto de matriz obtida a partir de resíduos, o tema de logística reversa vem ganhando cada vez mais força nos debates sobre a gestão de resíduos sólidos no Brasil, reforçando o emprego de termoplásticos provenientes da reciclagem para a utilização em compósitos, visando a substituição dos polímeros virgens, como por exemplo na indústria automotiva. Segundo Hemaís (2003), na década de 70 eram empregados uma média de 30 quilos de polímero por veículo, posteriormente na década de 90 esse valor passou a ser de 180 quilos, podendo chegar a 200 quilos depois dos anos 2000.

No ano 2000, a produção global de veículos foi estimada em 59 milhões de unidades, enquanto que no Brasil, a produção de veículos durante o mesmo período foi de aproximadamente 1,7 milhões. Utilizando como média 100 quilos de polímero por veículo, a indústria automotiva global consumiu cerca de 5,9 milhões de toneladas de plástico. No caso do Brasil, esse valor foi de aproximadamente 170 mil toneladas (HEMAIS, 2003)

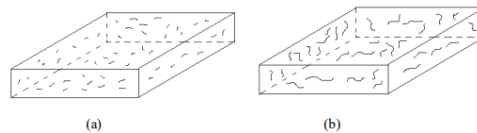
Diante deste cenário, o presente projeto possui o objetivo de avaliar como a influência do efeito do tamanho das aparas nas propriedades no plano (tração) em laminados compósitos processados com resíduos de tecidos em fibras de carbono e matriz termoplástica de Polietileno Tereftalato (PET), além da comparação das propriedades com materiais de outras fontes não renováveis visando a possível substituição em um estudo de caso.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Compósitos reforçados com fibras

As propriedades mecânicas de um compósito reforçado com fibras são influenciadas não apenas pelas propriedades intrínsecas da fibra, mas também pela sua arquitetura e orientação, pela concentração das fibras e pela distribuição das mesmas pela matriz. Em relação ao comprimento das fibras, existem dois tipos: as fibras contínuas e as fibras descontínuas ou curtas (DIACENCO, 2010).

Figura 1 – (a) Compósitos com fibras curtas; (b) Compósitos com fibras longas



Fonte: DIACENCO, 2010.

As fibras como reforço em compósitos resultam em melhorias em diversas propriedades do material na manufatura de geometrias complexas, como resistência à tração, além de vantagens como integridade estrutural sob cargas estáticas e dinâmicas, e conformabilidade. Entre os diversos reforços adicionados à matriz polimérica para produzir compósitos, as fibras são amplamente utilizadas. Elas podem ser de origem sintética, como a fibra de vidro e de carbono, ou de origem vegetal, como as fibras de juta, coco e sisal (PEIXOTO, 2019).

Além disso, as propriedades mecânicas não dependem apenas das propriedades da fibra, dependem do quanto é efetivo a transmissão de carga entre a fase matriz e a fibra, desta forma as melhores propriedades mecânicas estão ligadas a distribuição da fibra, ou seja, quanto mais uniforme for a distribuição, melhores serão as propriedades dos compósitos (GUIMARÃES, 2018).

Apesar da eficiência do reforço ser menor em fibras descontínuas em relação a fibras contínuas, os compósitos de fibras curtas vêm ganhando cada vez mais espaço no mercado. Tais compósitos podem ser produzidos com módulos de elasticidade e limites de resistência à tração entre 50% e 90%, se comparado às fibras contínuas. (CALLISTER; RETHWISCH, 2002).

2.2 Propriedades mecânicas das fibras curtas

De acordo com Poletto et al. (2009), o aumento da fração volumétrica de fibras em um material compósito faz com que amplie o módulo de elasticidade, tornando os compósitos mais rígidos. Além disso, a adição de fibras à matriz faz com que os compósitos tenham deformação reduzida, quando comparados com a matriz. Entretanto, foi destacado que um compósito com 20% em massa de fibras pode apresentar deformação superior à matriz. Ou seja, é importante que

se determine o balanço de fases matriz e fibra em um compósito, pois o aumento da resistência à tração e deformação na ruptura está associada à transferência de esforços da fase matriz para as fibras.

Existe ainda uma relação entre o comprimento crítico e a quantidade de fibras na matriz, onde se atinge um máximo de resistência à tração. Em quantidades pequenas de fibras, elas agem como defeitos e podem reduzir a resistência, porém em grandes quantidades, as fibras ficam emaranhadas, diminuindo a interação entre a fibra e a matriz e também diminuindo a resistência à tração (POLETTTO et al., 2009).

2.3 Matriz polimérica

A matriz em compósitos desempenha várias funções, tais como revestir e preencher os espaços vazios entre os reforços, orientar e fixar os reforços em suas posições. A matriz é responsável por transmitir a tensão aplicada às fibras, que são as responsáveis por suportar os carregamentos. Para obter a melhor transmissão de carga, é necessário que a matriz apresente um módulo de elasticidade baixo e uma alta ductilidade. A escolha da matriz é um fator crucial para determinar as propriedades e o desempenho do material compósito (RIUL, 2017).

Os polímeros são frequentemente utilizados como matrizes em compósitos devido às suas propriedades mecânicas vantajosas, incluindo baixa massa específica, facilidade de fabricação, custo reduzido e boa resistência mecânica à temperatura ambiente. Além disso, os polímeros podem ser processados a baixas temperaturas, minimizando problemas associados à degradação do reforço. O uso desses materiais cresceu rapidamente, mas ainda apresenta algumas desvantagens, como limitações à temperatura elevada quando comparada aos metais, instabilidade dimensional devido aos altos coeficientes de expansão térmica, grande sensibilidade à radiação e possível absorção de umidade do ambiente (PEIXOTO, 2019).

Os polímeros termoplásticos apresentam a característica de amolecimento gradual quando submetidos a um aumento de temperatura ou a temperatura e pressão, permitindo sua moldagem devido à mobilidade de suas moléculas, e quando resfriados, voltam a se tornar sólidos. Em contraste com os polímeros termorrígidos, os termoplásticos não formam ligações cruzadas, podendo ser reprocessados por meio de temperatura e pressão para alcançar um estado de maior fluidez novamente, o que os torna recicláveis e solúveis (CANEVAROLO, 2013).

Os materiais termoplásticos em geral apresentam menor rigidez, resistência mecânica e resistência à fluência em comparação aos termorrígidos. Além da sua capacidade de reciclagem, os termoplásticos também oferecem um processo de reparo mais simples do que os termorrígidos, o que é uma característica altamente valorizada pela indústria (MAZUMDAR, 2001).

2.4 Interface dos compósitos

A ligação interfacial ocorre quando há adesão entre a fibra e a matriz, desta forma, para a adesão ocorrer ambos deverão estar em contato. Portanto, deve-se entender o conceito

de molhabilidade, que é a extensão na qual um líquido se espalha sobre uma superfície sólida. Uma fibra com boa molhabilidade significa que um líquido fluirá preenchendo as imperfeições da superfície, e portanto, retirando o ar deste local (NOSSA, 2011).

A tensão superficial ocorre nos líquidos quando há um desequilíbrio entre as forças agindo sobre as moléculas da superfície em relação às moléculas que se encontram no interior do líquido. A força resultante atrai as moléculas da superfície de um líquido para o seu interior, como estas forças tendem a diminuir a área superficial ocupada pelo líquido, a gota acaba adotando um formato esférico. A força que está atuando na superfície dos líquidos é chamada de tensão superficial ou o trabalho necessário para aumentar a superfície em uma unidade de área, conforme a Equação 1; onde γ é a tensão superficial; W é o trabalho e A a área da superfície (SHAW, 1975).

$$\gamma = \frac{W}{A} \quad (1)$$

Existem diversos métodos para se determinar a tensão superficial e são classificados em estáticos, dinâmicos e de separação. Alguns exigem equipamentos específicos e são mais precisos, enquanto outros não demandam equipamentos, porém apresentam menor precisão nos resultados Behring et al. (2004). Os métodos da gota ou por ângulo de contato podem ser utilizados para caracterizar a tensão superficial das fibras. A análise consiste na aplicação de uma gota de um líquido com valores padronizados em uma superfície da amostra, desta forma um ângulo de contato é formado entre a gota e a superfície. A partir disso, através da medida do ângulo e com o auxílio de modelos matemáticos é possível determinar os valores da tensão superficial. Os erros experimentais discutidos anteriormente começam a aparecer neste momento, pois a medida e a interpretação do ângulo de contato são realizadas de forma visual e, portanto, não há exatidão (NOSSA, 2011).

É necessário ressaltar que o ângulo de contato formado entre a interação líquido-sólido está relacionado com as forças adesivas, que são responsáveis pelo espalhamento da gota e por forças coesivas que contraem a gota, então o ângulo depende das tensões entre líquido-superfície (WONG et al., 2009).

2.5 Tração

Ao aplicar uma força em um corpo, é possível que o mesmo sofra tanto compressão quanto estiramento, e o sentido em que essa força é aplicada é um fator determinante nesse processo. Quando a força é aplicada na direção longitudinal do corpo, em sentidos opostos, ocorre uma tensão de tração que tende a esticar o corpo. Já quando a força é aplicada em sentidos opostos convergentes, ocorre uma tensão de compressão que tende a comprimir o corpo. A lei de Hooke estabelece que, para deformações elásticas, a tensão é diretamente proporcional à deformação, ou seja, quando um corpo é tracionado, o seu aumento de comprimento é linearmente proporcional à força de tração aplicada (HIBBELER, 2010).

A tração é um tipo de solicitação mecânica de grande importância na engenharia, que ocorre quando uma força é aplicada nas extremidades de um corpo na direção longitudinal. Esse processo pode resultar em uma deformação na direção de aplicação do carregamento e gerar uma tensão de tração na seção transversal do corpo. A tensão de tração é caracterizada por uma força de tração aplicada em um corpo e é definida como a razão entre a força de tração aplicada e a área da seção transversal do corpo. É importante destacar que a tensão de tração pode levar a uma ruptura do corpo se a tensão atingir o seu limite de resistência do material (CAVALCANTE, 2017).

A relação matemática entre a força de tração e a tensão resultante é expressa pela seguinte Equação 2:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

em que:

σ = tensão de aplicação (Pa),

F = força aplicada na direção longitudinal (N),

A = área transversal do corpo (m²).

A relação matemática entre a tensão e a deformação em corpos que obedecem à lei de Hooke é expressa pela Equação 3:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

em que:

σ = tensão de aplicação (Pa),

E = módulo de elasticidade do material ou Módulo de Young (Pa),

ε = deformação específica (adimensional).

É importante destacar que a lei de Hooke é válida apenas para deformações elásticas, ou seja, quando o corpo volta à sua forma original após a aplicação da força de tração ser interrompida. Para deformações plásticas, o comportamento do material é diferente e a relação entre tensão e deformação é não linear.

A Tabela 1 exemplifica alguns materiais e seus respectivos valores de módulo de elasticidade.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais

Material	Módulo de Young (GPa)
Aço	207
Cobre	110
Latão	97
Alumínio	69
Estanho	44,3
Chumbo	13,5
Polietileno (PET)	2,46 - 4,14
Cloreto de polivinila (PVC)	2,41 - 4,14
Epóxi	2,41
Policarbonato (PC)	2,38
Poliéster	2,04 - 4,41
Nylon	1,59 - 3,79

Fonte: adaptado de Callister; Rethwisch, 2002.

A deformação específica é uma grandeza física que representa a fração da mudança na dimensão de um material em relação à sua dimensão original, sendo uma medida da quantidade de deformação que o material sofreu. Tal grandeza é adimensional, e é calculada pela divisão da deformação total pela dimensão original do material. A deformação específica pode ser classificada em positiva ou negativa, dependendo do tipo de deformação sofrida pelo material.

A relação matemática entre a deformação sofrida por um corpo e o seu comprimento original é expressa pela Equação 4:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

em que:

ε = deformação específica (adimensional),

Δl = deformação sofrida pelo corpo (mm),

l_0 = comprimento original do corpo (mm).

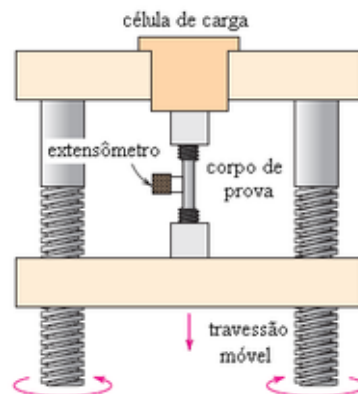
2.6 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um procedimento fundamental no estudo das propriedades mecânicas de materiais, muito utilizado na indústria para assegurar que os materiais atendam às exigências necessárias para sua aplicação. Esse ensaio consiste na aplicação de uma força axial em um corpo de prova, enquanto este é tracionado em sentidos opostos, de modo a avaliar sua capacidade de resistir à tração e deformação. Durante o ensaio, a força é gradativamente aplicada e a deformação é medida simultaneamente, permitindo a determinação de diversas propriedades mecânicas, tais como a resistência à tração, o limite de elasticidade, o alongamento na ruptura, entre outras. A tensão é avaliada como a relação entre a força aplicada e a área original da seção transversal do corpo de prova, enquanto a deformação é mensurada como a alteração na geometria do corpo de prova, que pode ser calculada como uma variação no comprimento ou

na espessura. Os dados obtidos a partir do ensaio de tração são cruciais para a avaliação da qualidade do material, sendo um dos critérios que norteiam a seleção do material mais adequado para cada aplicação (HIBBELER, 2010).

O ensaio de tração envolve a preparação de um corpo de prova do material que tem forma e tamanho padronizados, seguido da medição da área da seção transversal inicial do corpo de prova e do comprimento de referência. A seguir, é utilizada uma máquina de teste, conforme a Figura 2, para alongar o corpo de prova de forma controlada e normalmente a taxas de deslocamento constante (quase estático), até que o material atinja o ponto de ruptura. A máquina é projetada para registrar a carga e o deslocamento de forma simultânea.

Figura 2 – Representação do dispositivo utilizado para conduzir ensaios tensão-deformação por tração.



Fonte: Callister; Rethwisch, 2002.

A partir dos dados obtidos no ensaio de tração, é possível calcular os valores da tensão e deformação correspondentes à carga e o deslocamento, os quais são utilizados para a construção do gráfico denominado diagrama tensão-deformação. Esse diagrama é de grande relevância na engenharia, pois permite a obtenção de informações acerca do material, independentemente do seu tamanho ou forma física. O uso do diagrama tensão-deformação permite a avaliação de diversas propriedades mecânicas do material, como o limite de elasticidade, a resistência à tração, o alongamento na ruptura, entre outras (BEER, 2010).

2.7 Seleção de materiais

A metodologia Ashby (ASHBY, 2005), é uma abordagem sistemática para a seleção de materiais em projetos de engenharia. A metodologia Ashby se baseia no conceito de que a seleção do material ideal depende das propriedades requeridas para a aplicação, assim como das restrições do projeto, tais como: custo, disponibilidade, facilidade de processamento, entre outros. De acordo com Scheleski (2015), a seleção ocorre em quatro etapas: levantar os requisitos de projeto; filtrar usando restrições; isto é, eliminar alternativas que não atendam às restrições;

classificar materiais que maximizam o objetivo do projeto e por fim; uma maneira de relacionar com pesquisas e literatura já existente a respeito do material.

Consequentemente, a seleção de materiais em projetos de engenharia requer a análise e a relação entre parâmetros dos materiais, objetivos do projeto e funções matemáticas para a definição de um índice que auxilie na tomada de decisão. Esse índice é conhecido como Índice de Mérito (M), cujo propósito é maximizar as propriedades dos materiais. Em outras palavras, o material que apresentar o melhor índice mérito será a melhor escolha, a menos que haja exceções, como o custo, que também deve ser avaliado de forma paralela como critério de escolha (SOUZA et al., 2017).

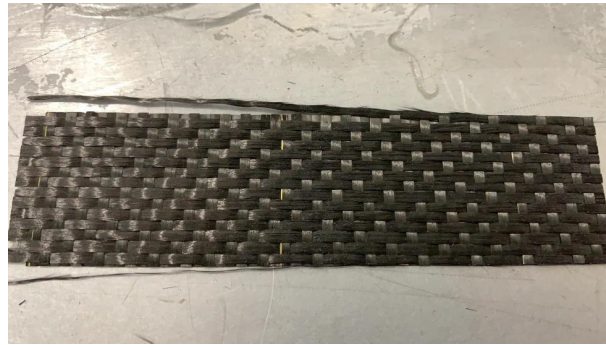
Por fim, após os resultados analíticos é possível restringir alguns materiais que se enquadram no projeto através da comparação dos resultados com valores já pré estabelecidos pela literatura ou por softwares e catálogos disponíveis. Porém, seguindo a metodologia em si, a seleção ocorre efetivamente com base em um gráfico que relaciona as propriedades requeridas com as propriedades dos materiais disponíveis. O gráfico utilizado na metodologia Ashby é conhecido como diagrama de Ashby, ele apresenta em um mesmo gráfico diferentes propriedades dos materiais, como densidade, resistência mecânica, rigidez, resistência a tração, entre outras. A partir do diagrama, é possível selecionar um conjunto de materiais que atendam às propriedades requeridas através do índice M (ASHBY, 2005).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Caracterização da fibra

As fibras para reuso foram do tipo carbono em forma de tecido tramado de configuração 5HS Harness Satin (Figura 3), as quais passaram por um processo de seleção e cortadas para disposição no molde em liga de alumínio aeronáutico de dimensões de (250 x 250 x 2)mm.

Figura 3 – Tecido de fibra de carbono costurado em lâminas



Fonte: elaborado pelo autor.

Os tecidos em geometrias e dimensões que foram estabelecidas neste projeto tiveram sua arquitetura e empilhamento controlados para rastreamento de falhas, provenientes das discontinuidades. No total foram confeccionadas três placas com a fração volumétrica de fibras constante, calculado segundo a Eq. (2). Em que V_f é a fração volumétrica de fibras, g_{sm} a gramatura do tecido, n_p o número de camadas, ρ_f a massa específica da fibra e t a espessura do molde. Desta forma, utilizando a Eq. 5 e os dados disponíveis na Tabela 2, determinou-se um valor de fração volumétrica de fibras em 52%.

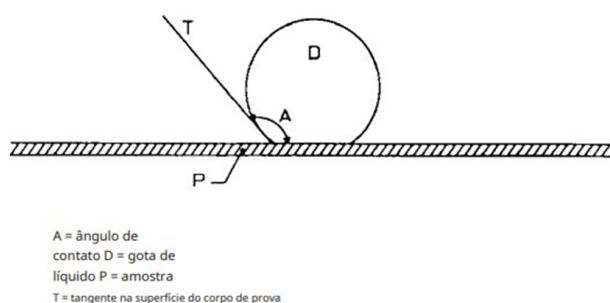
$$V_f = \frac{g_{sm} \cdot n_p}{\rho_f \cdot t} \quad (5)$$

Tabela 2 – Especificações do material utilizado.

Gramatura do tecido (g/m^2)	Número de camadas	Massa específica da fibra (g/cm^3)	Espessura do molde (mm)
375	5	1,8	2

Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, realizou-se a análise da molhabilidade, seguindo a norma D7490-13 (2013), com o propósito de avaliar a afinidade físico-química e, portanto, a sinergia da interface do material. A prática se resume em gotejar uma gota de água destilada com o auxílio de uma seringa calibrada, onde o sólido a ser analisado estará no goniômetro. O goniômetro é um equipamento composto por uma fonte de luz controlada e uma câmera para visualização da amostra. O equipamento é conectado a um computador onde um software fará o processamento dos dados, e dessa forma analisa-se o ângulo formado entre o líquido e sólido. É importante ressaltar que o ensaio deve ser realizado com extrema cautela e utilizando algumas ferramentas para movimentar o sólido, evitando que possa ter o contato das mãos e contamine a amostra, pois a gordura corporal interfere no procedimento.

Figura 4 – Análise do aumento do ângulo de contato em relação às tensões superficiais.

Fonte: D7490-13, 2013.

Observando a Figura 4, uma tangente é traçada a partir do ponto de contato entre o fluido e a superfície para se estimar o ângulo interno formado. Dessa forma, pode-se dizer que o material sólido é hidrofóbico caso o ângulo seja maior que 90° ou em algum valor entre 45° a 90° e caso o ângulo seja menor que 45° considera-se como hidrofílico.

3.2 Caracterização do filme

Como matriz, foi empregada a matriz termoplástica PET em forma de filme, polímero de fácil acesso e possível de ser submetido a ciclos de reciclagem. Foi conduzida a análise térmica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) no filme PET, com massa da amostra de 2,00 mg, fluxo de nitrogênio de 40,0 ml/min, com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ e com a variação de temperatura de -40°C até 300°C , de acordo com a norma D7028-07 (2007), para obtenção dos parâmetros de processamento: Temperatura de Fusão (T_m) e Temperatura de Transição Vítreia (T_g).

3.3 Processamento

O laminado foi processado a partir de prensa hidráulica com aquecimento, Figura 5 - adquirida com projeto FAPESP 2017/16160-8, com aquecimento de até 400 °C nos platôs inferior e superior e pressão máxima de trabalho de 120 bar, condições suficientes para desenvolvimento do projeto.

Figura 5 – Tecido de fibra de carbono costurado em lâminas



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a confecção das quatro placas, sendo uma de referência (sem falhas) e outras três provenientes de fibra de reuso, utilizou-se comprimento de aparas de fibras de tamanhos: 19,5 mm, 39,5 mm e 59,5 mm. A placa de referência foi adotado o tamanho de retalho de 126,5 mm X 255 mm para todas as camadas, uma vez que serão processadas duas placas por molde. Já para as demais placas de teste, cujo objetivo é introduzir as falhas nas discontinuidades, os cortes seguiram as dimensões conforme dispostas nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Medidas dos retalhos da placa com comprimento crítico de 19,5 mm.

Camada	Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)
1	2	126,5	126,5
2	2	106,0	126,5
	1	40,0	126,5
3	2	126,5	126,5
4	2	106,0	126,5
	1	40,0	126,5
5	2	126,5	126,5

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Medidas dos retalhos da placa com comprimento crítico de 39,5 mm.

Camada	Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)
1	2	126,5	126,5
2	2	86,0	126,5
	1	80,0	126,5
3	2	126,5	126,5
4	2	86,0	126,5
	1	80,0	126,5
5	2	126,5	126,5

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Medidas dos retalhos da placa com comprimento crítico de 59,5 mm.

Camada	Quantidade	Comprimento (mm)	Largura (mm)
1	2	126,5	126,5
2	2	66,0	126,5
	1	120,0	126,5
3	2	126,5	126,5
4	2	66,0	126,5
	1	120,0	126,5
5	2	126,5	126,5

Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, cortou-se o filme de PET de acordo com as dimensões do molde (250 mm X 250 mm). Dessa forma, determinou-se a quantidade de camadas de matriz necessária para compor o empilhamento e processamento da placa, calculado através da Eq.6. Sendo V_{filme} , o volume de cada filme, V_{matriz} , o volume de matriz e n_{filme} , o número de camadas de filme.

$$n_{filme} = \frac{V_{matriz}}{V_{filme}} \quad (6)$$

Desta forma, calculou-se o volume do molde utilizando a Eq. 8, adotando as dimensões de área do mesmo e com uma espessura de 2 mm.

$$V_{molde} = A_{molde} \cdot t_{molde} = 255mm \times 255mm \times 2mm = 130050mm^3 \quad (7)$$

A partir disso, como foi calculado anteriormente pela Eq. 5, a fração volumétrica de fibras é de 52%, logo tem-se a fração volumétrica da matriz de 48%. Desta forma, multiplicando a fração volumétrica do filme pelo volume do molde, pode-se determinar o $V_{matriz} = 62425mm^3$. Utilizando-se como base a Eq. 8, calculou-se o V_{filme} , sendo que a espessura do filme é de 0,125 mm.

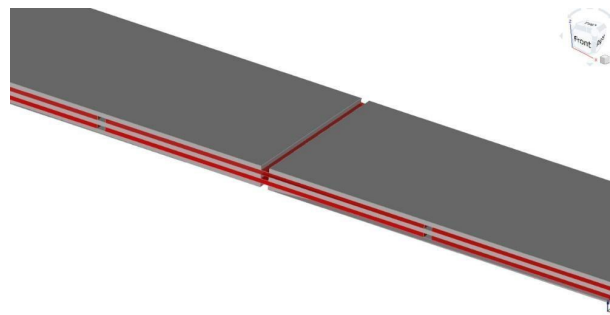
$$V_{filme} = A_{filme} \cdot t_{filme} = 255mm \times 255mm \times 0,125mm = 8128,12mm^3 \quad (8)$$

Logo em seguida, utilizando a Eq. 6, calculou-se o número de camadas de filme necessários. Ressaltando que, adicionou-se 20% a mais do total de matriz para compensar as perdas durante o processo, pois como se trata de uma prensa hidráulica com aquecimento, parte do filme fundido perde-se devido ao preenchimento dos canais de vedação do molde durante o processamento.

$$n_{filme} = \frac{6225mm^3}{8128,12mm^3} \cdot 1,2 \approx 10 filmes \quad (9)$$

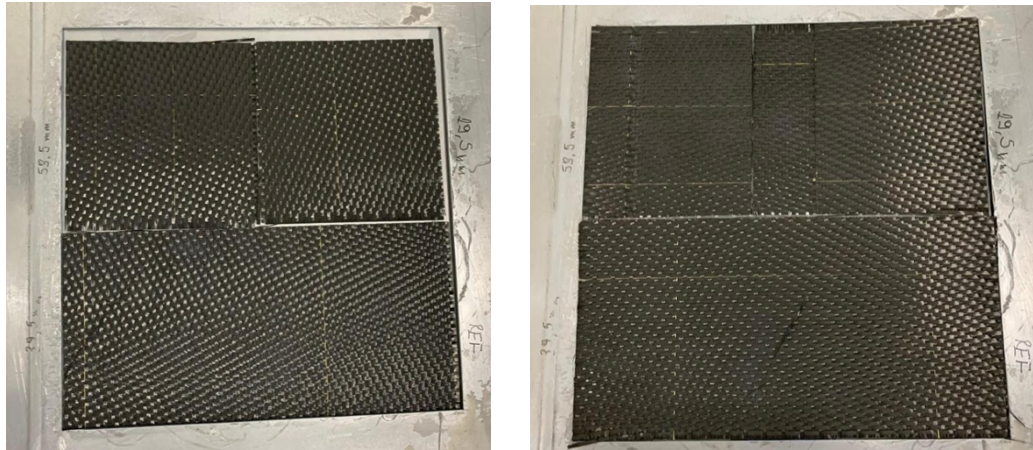
Assim sendo, iniciou-se o processo de montagem das placas, assim como exemplificado na Figura 6, o empilhamento ocorreu de forma alternada entre fase reforço e fase matriz. Vale ressaltar que, durante o processo de empilhamento das camadas, o tecido satin é assimétrico em que se seguiu uma sequência de empilhamento quase-simétrico em relação ao plano médio para evitar o empenamento.

Figura 6 – Tecido de fibra de carbono costurado em lâminas



Fonte: elaborado pelo autor.

Desta forma, durante a montagem as duas primeiras camadas de fibra (camadas 1 e 2) foram colocadas de forma que as fibras da trama ficassem na vertical. A fibra do meio (camada 3) poderia assumir qualquer uma das orientações, pois o número de camadas adotadas foi ímpar, porém também foi orientada de forma vertical. Já as duas últimas camadas (camada 4 e 5) foram inseridas horizontalmente conforme a Figura 7.

Figura 7 – Representação das camadas 1 e 4 do laminado.

Fonte: elaborado pelo autor.

Logo em seguida, após todas as camadas serem dispostas no molde, iniciou-se o processo de moldagem por compressão a quente. O processo consiste em aplicar pressão no molde enquanto que o mesmo é aquecido a determinada taxa de aquecimento, até atingir a temperatura necessária para que o PET passe do estado sólido para o fundido. Para isso, deve-se seguir algumas etapas de aquecimento em que o platô superior e inferior é aquecido de forma alternada para que a temperatura do molde seja a mesma, e uma sequência de aplicação de pressão escalonada, de forma que ao mesmo tempo que a matriz sofra fusão, ela seja comprimida também e a matriz permeie no tecido. O processo acima foi descrito experimentalmente a partir da Tabela 6 e 7.

Tabela 6 – Processo experimental da moldagem por compressão a quente da placa de referência e 19,5mm.

Temperatura inicial (C°)	Temperatura final (C°)	Platô	Pressão (bar)
27	100	Superior	5
25	100	Inferior	5
100	200	Superior	20
128	210	Inferior	60
203	265	Superior	120
259	275	Inferior	120

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Processo experimental da moldagem por compressão a quente da placa 39,5mm e 59,5mm.

Temperatura inicial (C°)	Temperatura final (C°)	Platô	Pressão (bar)
25	100	Superior	11
40	100	Inferior	11
103	200	Superior	26
114	210	Inferior	70
204	265	Superior	127
254	275	Inferior	134

Fonte: elaborado pelo autor.

Como se trata de um processo de compressão a quente, o PET sofre um processo de fusão, penetrando entre cada camada de fibra, permitindo que toda a fibra entre em contato com a fase matriz. Dessa forma, é necessário aguardar para que o molde resfrie e o PET volte ao seu estado sólido, garantindo a consolidação do material.

3.4 Análise via microscopia óptica

Após o processamento das placas, foi realizada uma análise da qualidade do material por microscopia óptica, com o objetivo de verificar a homogeneidade da fase matriz e a fase fibra durante sua formação. Para uma imagem mais nítida, a amostra foi polida com lixa d'água com granulometria 600 até 2500.

3.5 Ensaio mecânico

Como o objetivo da pesquisa é compreender as propriedades mecânicas do material produzido, avaliou-se as propriedades no plano em um ensaio de tração seguindo a norma D3039M-17 (2017). O qual recomenda no mínimo cinco amostras por condição de teste, isto é, no caso do presente trabalho será investigado o efeito da descontinuidade (falhas) e o empilhamento (número de camadas), portanto para cada caso foram necessárias cinco amostras para resultados significativos. Foi realizado um corte em todas as placas para se obter as medidas padrão do ensaio, que no caso foram: 20 mm de largura, 250 mm de comprimento e 2 mm de espessura, conforme a Figura 8.

Utilizou-se os parâmetros estabelecidos pela norma durante o ensaio, como por exemplo: velocidade, umidade e temperatura. Para a velocidade determina-se que o procedimento tenha uma taxa de deslocamento (taxa de estiramento da amostra) constante de 2 mm/min. A umidade e a temperatura não possuem parâmetros definidos, portanto, é importante que a amostra fique armazenada no mesmo ambiente até o momento do teste para que não ocorram interferências por conta da influência dessas variáveis, por exemplo, dilatação do material.

Figura 8 – Cortes para elaboração do ensaio.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.6 Estudo de caso: seleção de materiais

Após a conclusão dos ensaios e obtenção dos resultados, iniciou-se o estudo de caso de acordo com o objetivo do trabalho. Para tal, utilizou-se da metodologia Ashby como fundamentação teórica. Seguindo a metodologia, foram adotados critérios de projeto para se utilizar menos material em condições de carregamento sobre tração, que neste caso aplica-se a geometria de seção regular. Portanto, a partir destas informações adotou-se as relações físicas necessárias para o projeto.

A quantidade a ser minimizada, que neste caso é a massa da barra a qual pode ser relacionada por meio da Equação 10, como função objetivo.

$$m = A.L.\rho \quad (10)$$

em que:

m = massa (Kg);

A = área da seção transversal (m^2);

L = comprimento da barra (m);

ρ = massa específica (g/cm^3).

Note, que neste caso seria possível reduzir a massa diminuindo a área da seção transversal, comprimento da barra ou massa específica, porém o objetivo é a substituição do material pré-existente não podendo haver alteração estrutural. Portanto, é uma restrição do projeto, a área

da seção deve ser suficiente para suportar a carga de tração F , exigindo que a tensão de tração obedeça ao critério definido pela Equação 11:

$$\sigma_{max} \geq \frac{F}{A} \quad (11)$$

em que:

σ_{max} = resistência a tração máxima (MPa) - propriedade do material;

A = área da seção transversal (m^2);

F = carga aplicada (N) – condições do projeto.

Assim sendo, combinou-se a Equação 10 e 11 com o objetivo de eliminar a área da seção transversal dos parâmetros de projeto, encontrando-se a Equação 12:

$$m \geq F.L. \left(\frac{\rho}{\sigma_{max}} \right) \quad (12)$$

Dessa forma, analisando-se a equação, conclui-se que a barra mais leve que resistirá a uma carga F é aquela feita com material de menor valor de (ρ/σ_{max}) e este parâmetro será definido como o índice do projeto. Porém, para termos em engenharia o mais usual em termos de propriedades dos materiais, devemos expressar de uma forma a buscar o máximo entre as relações, portanto o índice é descrito pela Equação 13:

$$M = \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (13)$$

Assim, com os resultados obtidos através do ensaio de tração será possível calcular o índice de projeto do compósito confeccionado e comparar com índice de outros materiais de fontes não renováveis e analisar sua aplicabilidade.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise da fibra de carbono

O ensaio de molhabilidade teve como objetivo avaliar se a fibra era hidrofílica ou hidrofóbica, pois essa interação reflete diretamente em como a fase matriz e a fase reforço irão se comportar durante o teste mecânico. A Tabela 8 exibe os resultados dos ângulos de contato para amostra de fibra.

Tabela 8 – Valores encontrados para os Ângulos de Contato (AC) da fibra.

Material	AC direita (°)	AC esquerda (°)	AC médio (°)
Fibra de Carbono	25,19	24,95	25,07

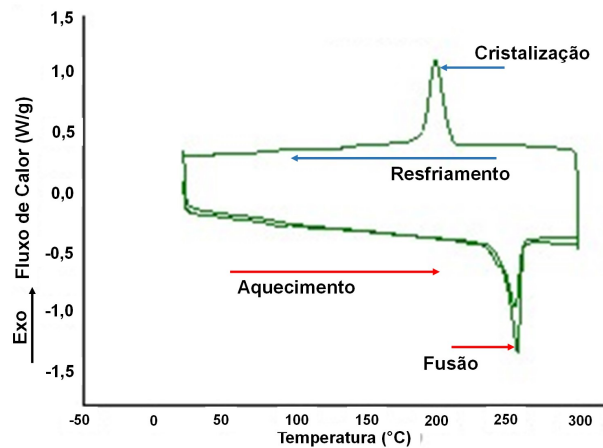
Fonte: elaborado pelo autor.

Como o goniômetro indica os valores de ângulo de contato formado em ambos os lados da gota d'água, utiliza-se o valor médio entre eles como resultado. De acordo com a literatura, quando o ângulo formado é menor que 45° pode-se dizer que o material é hidrofílico. Assim, quando comparamos os resultados obtidos com outros estudos, por exemplo, os resultados obtidos por Nossa (2011), é possível visualizar que a fibra de carbono tem ângulos de contato inferiores a 45°. Portanto, como o valor encontrado foi de 25,07° consegue-se afirmar que a fibra de carbono utilizada no estudo é hidrofílica.

Dessa forma, o reforço sendo hidrofílico significa que o mesmo possui uma moderada molhabilidade, ou seja, o PET quando em estado líquido fluirá sobre a fibra de carbono preenchendo as imperfeições da superfície e, portanto, deslocando o ar destes espaçamentos. Tal fato, é de extrema importância durante processamento do material, porém tal fato não garante a adesão adequada entre os constituintes, já que o PET apresenta características hidrofóbicas (YANG et al., 2009).

4.2 Análise do PET

A partir dos resultados obtidos do DSC realizado no filme PET, identificou-se a temperatura de fusão para o processamento do material. A Figura 9 possibilita a identificação das transições térmicas que ocorrem durante o aquecimento e resfriamento do filme. A linha inferior se refere ao início do aquecimento, onde há um pico por volta dos 255°C, este pico é a temperatura de fusão do material e a temperatura definida para o processamento. Logo após, o material inicia o seu processo de resfriamento, identificado pela linha superior, a qual também existe um pico de cristalização, onde o material inicia a solidificação.

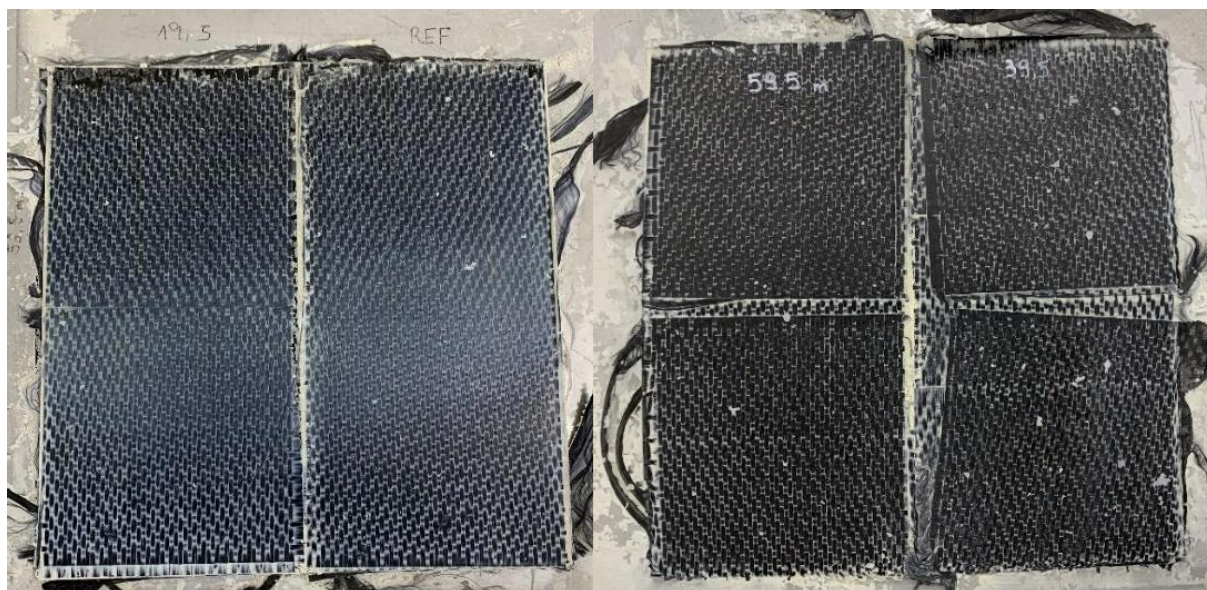
Figura 9 – Gráfico DCS - PET.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 Processamento do compósito

O processamento das quatro placas foi realizado de acordo com os parâmetros estabelecidos. Como previsto, verificou-se uma permeabilidade adequada da fase viscosa no reforço através da análise qualitativa via microscopia óptica, possibilitando a penetração do PET no seu estado líquido entre as fibras durante o aquecimento. Houve compressão com pressão ajustada para garantir o fechamento do molde e compactação do tecido e filme polimérico, auxiliando na supressão de ar entre as fases. Na Figura 10, pode-se observar o resultado do processamento das placas com tamanho de fibra controlado e da placa de referência. Na placa à esquerda, na qual contém a placa de referência e a placa com comprimento crítico de 19,5 mm, o material permaneceu alinhado com as camadas durante o processo de prensagem, sem nenhum deslocamento.

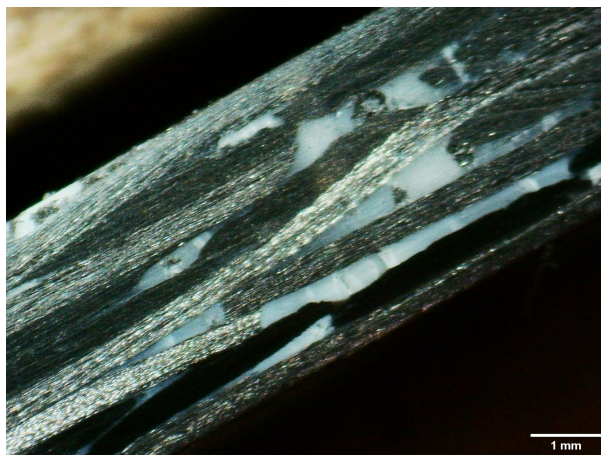
Figura 10 – Placas teste e referência.



Fonte: elaborado pelo autor.

No entanto, na placa da direita, correspondente às placas com comprimento crítico de 39,5 mm e 59,5 mm, o resultado foi conforme o esperado, exceto pela última camada em que o material sofreu deslocamento ao ser inserido no molde. Embora não se espere que o desalinhamento da última camada afete os testes de tração, é necessário considerar esse fato durante a análise dos resultados.

Por meio da técnica de microscopia óptica foi possível observar as disposições das camadas de tecido no compósito e sua qualidade nos termos de distribuição de matriz. A avaliação das imagens confirmou a ocorrência de uma interação efetiva entre as fases, permitindo que o PET penetrasse entre os poros do tecido da fibra, como pode ser observado nos pontos brancos da Figura 11. A parte branca apresentada se deve à diferença de contraste gerada pela interação da luz do microscópio. Devido ao fato de que as fibras estão na forma de tecido, elas podem ser visualizadas formando uma ondulação (região brilhante - orientação de 90°) com pontos brancos da matriz.

Figura 11 – Seção transversal do compósito.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.4 Ensaio de tração

No presente estudo, foram avaliados os efeitos da descontinuidade das fibras em compósitos submetidos às forças de tração. Para tal, foram considerados diversos parâmetros, tais como a adesão da fibra com a matriz, o comprimento da fibra e a fração volumétrica de fibra. Em particular, o comprimento da fibra foi utilizado como parâmetro de projeto para um tipo de compósito que tem-se a expectativa de mudança de comportamento no ensaio de tração, uma vez que quanto menor o tamanho da fibra, menos eficiente é a transferência de carga, o que resulta em uma menor resistência do material (LIU et al., 2015).

Considerando que o equipamento utilizado não fornece diretamente os valores de tensão de tração, mas sim os valores de força por deslocamento, utilizou-se a Equação 2 para obter a tensão máxima de tração. Para o cálculo do módulo de elasticidade, utilizou-se a Equação 3 e como bases os gráficos de tensão *versus* deformação. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos através dos cálculos.

Tabela 9 – Resultados do ensaio mecânico.

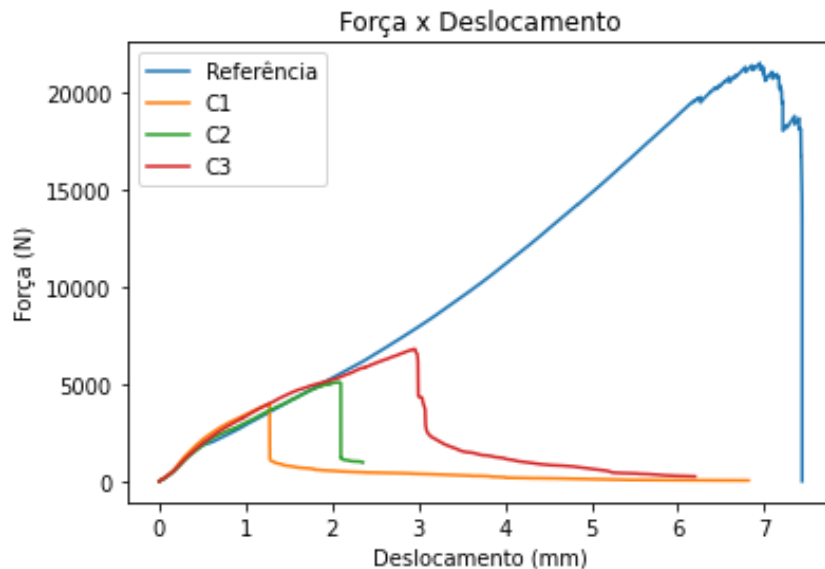
Material	Referência	C1	C2	C3
F_{max} (N)	21381,80 ± 2511,57	3729,26 ± 536,50	4921,55 ± 1516,66	6238,68 ± 1027,55
σ_{max} (MPa)	537,23	93,95	123,66	156,75
Δl (mm)	8,2	1,38	1,92	2,7
E (GPa)	16,37	17,01	16,10	14,51

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme mencionado anteriormente, a transferência de carga é mais eficiente quando o comprimento da fibra é maior em relação ao tamanho crítico, sendo o menor comprimento relacionado ao laminado C1 e o maior C3, resultando em uma maior resistência mecânica até o ponto de ruptura, isso foi comprovado pela análise da Figura 12. Como o material de referência

se trata de fibras contínuas, seu comportamento ficou dentro do esperado, com os maiores valores de resistência à tração. No entanto, em relação aos materiais compósitos com descontinuidades, a maior resistência à tração ocorreu no corpo de prova C3, que possuía o maior comprimento crítico.

Figura 12 – Força versus deslocamento.



Fonte: elaborado pelo autor.

Comparando os resultados obtidos com a literatura existente, apresentada na Tabela 10, observou-se que o valor de resistência à tração do material de referência está em conformidade com os valores reportados. Contudo, como esperado, os valores dos compósitos descontínuos foram inferiores aos limites estabelecidos pela literatura. Esse comportamento pode ser atribuído à existência de falhas intrínsecas da interrupção gerada pelo menor comprimento de fibra, que levam a uma transferência de carga reduzida e, consequentemente, a uma menor resistência mecânica. Além disso, os resultados abaixo do esperado atribuem-se ao fato do PET ser hidrofílico, isto é, a adesão entre as fases pode ter sido prejudicada e, consequentemente, os resultados dos testes.

Tabela 10 – Resistência à tração de materiais de engenharia

Material	σ (MPa)
Compósitos	
Carboneto de alumínio/silício	290 - 365
Reforçados com Fibra de Carbono (CRFC)	550 - 1050
Compósitos Reforçados com Fibra de Vidro (CRFV)	138 - 241
Polímeros	
ABS	27.6 - 55.2
Nylon	90 - 165
PET	48.3 - 72.4
Polietileno (PE)	20.7 - 44.8
Polipropileno (PP)	27.6 - 41.4
Poliestireno (PS)	35.9 - 56.6
Poli(éter-éter-cetona) (PEEK)	70 - 103
Policloreto de Vinila (PVC)	40.7 - 65.1

Fonte: ASHBY, 2005.

Ao comparar o desempenho mecânico das três placas com fibras descontínuas com outros materiais, como os polímeros termoplásticos, pode-se observar que todos os resultados foram satisfatórios. Esse fato sugere a possibilidade de substituição desses materiais, uma vez que são provenientes de fontes não renováveis, por materiais compósitos fabricados a partir de materiais reutilizados.

4.5 Estudo de caso

Como os resultados encontrados sugerem a possibilidade da substituição de materiais não renováveis pelo compósito processado, é interessante realizar a comparação com um parâmetro de projeto, pois apenas analisar qualitativamente e separadamente cada valor encontrado não sugere efetivamente sua aplicabilidade. Portanto, utilizando a metodologia de seleção de materiais será possível traduzir melhor os resultados encontrados quando aplicados em situações que levam em conta a realidade.

Segundo Hemais (2003) os polímeros mais utilizados para a produção de veículos são os Polietilenos de alta densidade, por exemplo: polietileno (PP), politetrafluoroetileno (PTFE), poli (tereftalato de butileno)(PTB), poli (sulfeto de fenileno)(PPS), policarbonato (PC), dentre outros. Portanto, será utilizado tais polímeros como base de comparação nos critérios de projeto para se aplicar menos material em condições de carregamento sobre tração, em particular, será adotado a geometria de seção regular. Portanto, será calculado o índice M do projeto, para tal utilizou-se a base de dados fornecida por Ashby (2005) para encontrar os valores de massa específica e resistência à tração de algum dos polímeros citados.

Utilizando-se a Equação 13 e os dados encontrados na literatura, calculou-se o índice M dos materiais polímeros e do compósito processado. A Tabela 11 resume os valores adotados

para o cálculo e seus índices M, respectivamente.

Tabela 11 – Índice M

Material	σ_{max} (MPa)	ρ (g/cm ³)	M (10 ⁻³ m/s ²)
PP	27.6 - 31.4	0.89 - 0.91	31.0 - 45.5
PTFE	20 - 30	2.14 - 2.2	9.3 - 13.6
PC	60 - 70.2	1.14 - 1.21	52.6 - 58
PEEK	70.0 - 103.1	1.30 - 1.32	53.8 - 78.1
ABS	27.6 - 55.2	1.01 - 1.21	27.3 45.6
Referência	537.2	1.53	351.1
C1	93.9	1.53	61.4
C2	123.6	1.53	80.8
C3	156.7	1.53	102.4

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme mencionado anteriormente, maximizar o valor de M é essencial para identificar o material que melhor atenda às exigências do projeto. Nesse contexto, foi constatado que o material de referência apresentou o maior valor de M, o que era esperado. No entanto, é importante destacar que os valores de C1, C2 e C3, que representam a fibra com descontinuidade, obtiveram resultados significativos em comparação aos polímeros utilizados. Tais valores sugerem que a fibra com descontinuidade pode ser uma opção promissora para aplicações em que se requer alta resistência mecânica.

É importante destacar que o valor da massa específica adotado para o material de teste foi obtido via cálculo teórico, o que retrata bem o índice M obtido. Importante ressaltar que para o laminado C1 o índice M é comparável com os demais polímeros, já para os laminados C2 e C3 o índice M é superior, o que pode levar uma redução da massa no projeto levando em conta a desigualdade da Equação 12, tornando o projeto de determinado produto mais eficiente.

5 CONCLUSÃO

O reaproveitamento de fibra de carbono tem sido objeto de crescente interesse na indústria devido à sua alta resistência e rigidez, além da sua baixa massa específica. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar a influência das falhas geradas pelas fibras descontínuas de um compósito de matriz polimérica reforçado com fibras de carbono (CRFC) nas suas propriedades de tração. Para isso, foi realizado um ensaio de tração para avaliar sua resistência mecânica, além da metodologia de Ashby para seleção de materiais em um estudo de caso para possível utilização da fibra em um projeto de engenharia.

Diante do exposto, pode-se afirmar que o comportamento do material se manteve dentro das expectativas, apresentando elevados valores de resistência mecânica e grande variação de um tipo de laminado para outro, de acordo com a presença de falhas no processo de produção. Quando comparado a outros materiais de fontes não renováveis, este material demonstrou valores satisfatórios para possíveis substituições. É importante ressaltar que os resultados foram influenciados pela adesão entre as fases durante o processamento, visto que a fibra de carbono apresenta características hidrofílicas e o PET é hidrofóbico. Outro aspecto relevante durante a análise dos resultados é que muitas informações foram obtidas a partir de literaturas pré-existentes, o que pode afetar a precisão dos resultados obtidos.

Por fim, para avaliar a viabilidade da substituição, torna-se necessário realizar estudos adicionais acerca das propriedades mecânicas, uma vez que um objeto está sujeito a cargas de diferentes naturezas (compressão, tração multiaxial, cisalhamento, entre outros) dependendo de sua utilização, e essas cargas combinadas podem não atender aos requisitos de uso do material.

REFERÊNCIAS

- ABDOU, T. R. **Recuperação de fibras de carbono presentes em descarte industrial de compósito polimérico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2015.
- ASHBY, M. F. **Materials selection in mechanical design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.
- BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BEER, F. P. **Resistência dos materiais**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010. 774 p.
- BEHRING, J. L. et al. Adaptação no método do peso da gota para determinação da tensão superficial: um método simplificado para a quantificação da cmc de surfactantes no ensino da química. **Química nova**, v. 27, p. 492–495, 2004.
- CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 249 p.
- CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros**. 3. ed. São Paulo: Artiber, 2013.
- CARBERRY, W. Airplane recycling efforts benefit boeing operators. **Boeing Aero Magazine QRT**, v. 4, n. 08, p. 6–13, 2008.
- CAVALCANTE, A. G. **Estudo de um material compósito de poliuretano e resíduo de pneu direcionado à fabricação de absorvedores de para-choque automotivo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.
- D3039M-17, D. A. **Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials**. West Conshohocken, 2017.
- D7028-07, D. A. **Standard test method for glass transition temperature (DMA Tg) of polymer matrix composites by dynamic mechanical analysis (DMA)**. West Conshohocken, 2007.
- D7490-13, D. A. **Standard test method for measurement of the surface tension of solid coatings, substrates and pigments using contact angle measurements**. West Conshohocken, 2013.
- DIACENCO, A. A. **Modelagem por elementos finitos de materiais compósitos estruturais incorporando material viscoelástico para o controle passivo de vibração e ruído**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2010.
- FREIRE, E.; MONTEIRO, E. E.; CYRINO, J. C. Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Associação Brasileira de Polímeros-ABPol, v. 4, n. 3, p. 25–32, 2013.

GUIMARÃES, F. A. **Avaliação das propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz termoplástica PPS reforçado com fibras de carbono contínuas e descontínuas.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2018.

HEMAIS, C. A. Polímeros e a indústria automobilística. **Polímeros**, v. 13, p. 107–114, 2003.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais.** 7. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010. 637 p.

LIU, Z. et al. Effect of fibre length and suspension concentration on alignment quality of discontinuous recycled carbon fibre. In: **20th International Conference on Composite Materials, ICCM 2015.** Copenhagen, Dinamarca: Aalborg University, 2015.

MAZUMDAR, S. **Composites manufacturing materials, product, and process engineering.** Florida: CrC, 2001.

NAKAMURA, T.; WU, L.-C. Effects of ply-arrangement on compressive failure of layered structures. **Engineering fracture mechanics**, Elsevier, v. 67, n. 5, p. 421–443, 2000.

NOSSA, T. d. S. **Estudo comparativo das tensões na interface de compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de carbono, aramida e vidro.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2011.

PEIXOTO, D. **Tipos de materiais compósitos.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

POLETTTO, M. et al. Influência do comprimento das fibras nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de poliestireno e fibras de sisal. In: **10 Congresso Brasileiro de Polímeros.** [S.l.: s.n.], 2009.

RIUL, C. **Desenvolvimento de compósitos estruturais de politetrafluoretileno (PTFE) com fibras contínuas.** Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia da Universidade Federal de São Paulo, 2017.

SCHELESKI, S. Seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas. **Design e Tecnologia**, v. 5, n. 09, p. 29–41, 2015.

SHAW, D. J. **Introdução à dinâmica dos colóides e de superfícies.** São Paulo: E. Blücher, 1975.

SOUZA, R. A. L. de et al. Software educativo para seleção de materiais utilizando a metodologia de ashby. **Cadernos UniFOA**, v. 12, n. 34, p. 35–45, 2017.

VENTURA, A. M. F. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência Tecnologia dos Materiais**, 2009.

WONG, S. C. et al. Use of hydroxypropylmethylcellulose 2% for removing adherent silicone oil from silicone intraocular lenses. **British journal of ophthalmology**, BMJ Publishing Group, v. 93, n. 8, p. 1085–1088, 2009.

YANG, L. et al. Surface modification of a biomedical polyethylene terephthalate (pet) by air plasma. **Applied Surface Science**, v. 255, p. 4446–4451, 02 2009.