



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE PROJETOS MECÂNICOS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

José Paulo Villa de Abreu Maia

**Proposta de metodologia de fabricação de tubos em fibra de carbono visando
a aplicação em cadeira de rodas**

Uberlândia
2023

José Paulo Villa de Abreu Maia

**Proposta de metodologia de fabricação de tubos em fibra de carbono visando
a aplicação em cadeira de rodas**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Uberlândia como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Profa. Dra. Gabriela Lima Menegaz

Uberlândia

2023



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	FEMEC41100 - Projeto de Fim de Curso II				
Data:	23/02/2023	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	11711EMC043				
Nome do Discente:	José Paulo Villa de Abreu Maia				
Título do Trabalho:	Proposta de metodologia de fabricação de tubos em fibra de carbono visando a aplicação em cadeira de rodas				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não				

Reuniu-se, em ambiente virtual, pelo link :

<https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3agNYqZUBFLMndgl5SoyBQZGXIWqVFpRgalc1uLShzvU1%40thread.tacv2/1676386328483?context=%7b%22Tid%22%3a%22cd5e6d23-cb99-4189-88ab-1a9021a0c451%22%2c%22Oid%22%3a%222f693686-f924-4606-a6c2-cd6c83b43610%22%7d>, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, em 23/02/2023, assim composta: Me. Renato Montandon de Lima - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Dr. Lucas S. Cardoso - Universidade Federal de Uberlândia - UFU e Profa. Dra. Gabriela Lima Menegaz - Universidade Federal de Uberlândia - UFU, orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos, a presidente da mesa, Profa. Dra. Gabriela Lima Menegaz - Universidade Federal de Uberlândia - UFU, apresentou a Comissão Examinadora e os candidatos, agradeceu a presença do público, e concedeu aos discentes a palavra, para a exposição do trabalho. A duração da apresentação dos discentes e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir os candidatos. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando os candidatos:

(x) Aprovado sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriela Lima Menegaz**, Usuário Externo, em 23/02/2023, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato Montandon de Lima, Usuário Externo**, em 24/02/2023, às 13:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas de Souza Cardoso, Usuário Externo**, em 24/02/2023, às 15:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4266430** e o código CRC **1D1E912C**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luciene Villa Maia e Paulo Roberto de Abreu Maia, por não pouparem esforços em detrimento da minha graduação e minha formação pessoal e profissional.

A minha irmã, Maria Villa que, mesmo com todas as dificuldades sempre esteve ao meu lado e me deu o suporte necessário para que essa etapa fosse concluída.

A minha namorada, Raianny Cunha Duarte, e sua família que durante todos esses anos confiaram em mim, me acolheram e me incentivaram a buscar os melhores caminhos.

Agradeço à minha orientadora, Gabriela Lima Menegaz que, desde o primeiro período da graduação foi o espelho que busquei seguir como aluno e profissional. Agradeço pela paciência, pelos ensinamentos e pela convivência ao longo de todos os anos da graduação.

Por fim, agradeço aos meus amigos, Alexandre, Clarissa, Daniel e Filipe por compartilharem essa maravilhosa jornada comigo, por todo o suporte, experiências e toda a convivência.

RESUMO

Segundo o Censo demográfico de 2010, realizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o número de pessoas com deficiência no Brasil ultrapassa os 40 milhões. Dessa forma, é importante pensar em políticas e soluções para que essas pessoas sejam inseridas na sociedade, como a prática esportiva. O Comitê Paralímpico Brasileiro (CPB) é responsável pela gestão e divulgação do esporte paralímpico no país, além de coordenar as delegações dos eventos paralímpicos. Para um bom rendimento nos esportes paralímpicos, as tecnologias assistivas devem ser voltadas ao rendimento do atleta, visando atender às suas necessidades individuais sem negligenciar seu conforto e segurança e, para o caso dos atletas brasileiros, que seja acessível financeiramente. Diante desse cenário, este trabalho busca oferecer alternativas mais economicamente viáveis e que auxiliem na melhora do desempenho de atletas que utilizem cadeiras de rodas por meio de uma metodologia de fabricação de tubos em fibra de carbono a partir de moldes feitos em manufatura aditiva. Para isso, foram realizados testes de fabricação e desenvolvimento de peças e seus respectivos moldes a fim de determinar quais os melhores parâmetros de fabricação no Laboratório. Posteriormente, foi feito um estudo de caracterização mecânica do modelo proposto executando ensaios de tração e flexão seguindo as normas ASTM D3039 e ASTM D790, respectivamente. Por último, foi feita uma validação de simulação computacional do ensaio de tração usando o software Ansys e seu módulo específico para simulação de compósitos, chamado de ACP. Como resultados dos ensaios, observou-se que as peças de fibra de carbono envoltas no molde apresentaram o comportamento mecânico esperado para o material e a simulação teve resultados compatíveis aqueles obtidos no ensaio de tração, com um erro médio de, aproximadamente, 9 %. Portanto, concluiu-se que a melhor forma de integração entre moldes de manufatura aditiva e PFRC's, para a laminação manual, seria revestindo o molde tubular e o incluindo na peça, de forma que não se tenham problemas com o processo de desmolde. No ensaio de tração foi obtida uma tensão de ruptura média de 95,74 MPa, deformação média de 12 % e módulo de elasticidade médio de 1006,08 MPa. Para o ensaio de flexão, foi obtida uma tensão de ruptura média de 71,05 MPa e deflexão média de 4,67 mm. Quanto ao software Ansys e seu módulo ACP, sua utilização e resultados foram satisfatórios devido à convergência das simulações para com os resultados experimentais.

Palavras-chave: Polímeros Reforçados por Fibra de Carbono; Tecnologia assistiva; ASTM D3039; ASTM D790; Laminação manual; Cadeiras de rodas

ABSTRACT

According to the 2010 Demographic Census, carried out by the IBGE (Brazilian Institute of Geography and Statistics), the number of people with disabilities in Brazil exceeds 40 million. Therefore, it is important to think about policies and solutions for these people to be included in society, such as sports. The Brazilian Paralympic Committee (CPB) is responsible for managing and publicizing Paralympic sport in the country, in addition to coordinating delegations to Paralympic events. For a good performance in Paralympic sports, assistive technologies must be focused on the athlete's performance, aiming to meet their individual needs without neglecting their comfort and safety and, in the case of Brazilian athletes, that it be financially accessible. Given this scenario, this work seeks to offer more economically viable alternatives that help improve the performance of athletes who use wheelchairs through a methodology for manufacturing carbon fiber tubes from molds made in additive manufacturing. For this, manufacturing tests and development of parts and their respective molds were carried out in order to determine the best manufacturing parameters in the Laboratory. Subsequently, a mechanical characterization study of the proposed model was carried out, performing tensile and flexion tests following the ASTM D3039 and ASTM D790 standards, respectively. Finally, a computational simulation validation of the tensile test was carried out using the Ansys software and its specific module for composite simulation, called ACP. As a result of the tests, it was observed that the carbon fiber parts wrapped in the mold presented the expected mechanical behavior for the material and the simulation had results compatible with those obtained in the tensile test, with an average error of approximately 9%. Therefore, it was concluded that the best form of integration between additive manufacturing molds and PFRC's, for manual lamination, would be by coating the tubular mold and including it in the part, so that there are no problems with the demolding process. In the tensile test, an average breaking stress of 95,74 MPa, an average deformation of 12% and an average modulus of elasticity of 1006,08 MPa were obtained. For the bending test, an average breaking stress of 71,05 MPa and an average deflection of 4,67 mm were obtained. As for the Ansys software and its ACP module, its use and results were satisfactory due to the convergence of the simulations with the experimental results.

Keywords: Carbon Fiber Reinforced Polymers; Assistive technology; ASTM D3039; ASTM D790; manual lamination; Wheelchair

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de pessoas com deficiência no Censo de 2010	10
Figura 2 – Histórico de conquista de medalhas da delegação brasileira em jogos paralímpicos desde sua primeira participação	11
Figura 3 – Centro de Treinamento Paralímpico, fundado em 2016 na cidade de São Paulo.	12
Figura 4 – Esquema de classificação dos materiais compósitos.	16
Figura 5 – Influência do ângulo de carregamento resistência e rigidez de um reforço fibroso.	17
Figura 6 – Relação de porcentagem de fibra e disposição física com a resistência, elasticidade e custo dos compósitos.	18
Figura 7 – Estrutura química de uma resina epóxi não curada.	20
Figura 8 – Desenho esquemático do processo de laminação manual de peças de polímeros reforçados por fibras de carbono.	21
Figura 9 – Desenho esquemático do processo de infusão à vácuo de peças de polímeros reforçados por fibras de carbono.	22
Figura 10 – Desenho esquemático do processo de laminação com a utilização de <i>vacuum bag</i>	23
Figura 11 – Crescimento estimado do mercado global de impressão 3D	24
Figura 12 – a) Modelo de cadeira <i>Quickie Match Point Ti</i> ; b) Modelo de cadeira <i>Top-End T-5 7000 Series</i>	29
Figura 13 – Modelos de cadeiras de rodas esportivas brasileiras. a) MB4 X-Treme - Ortomobil (R\$ 5039,10); b) Cadeira de Rodas Monobloco Sigma Smart Alumínio (R\$ 8091,00); c) Star Lite Premium Ortobrás (R\$ 5850,98) .	31
Figura 14 – Desenho esquemático de cadeira de rodas de fibra de carbono proposto por CN208864663U	32
Figura 15 – Desenho esquemático de aro da roda de uma cadeira de rodas de alto rendimento proposto por CN217319913U	32
Figura 16 – a) Visualização 3D da cadeira proposta; b) Tubulação utilizada no projeto de cadeira de rodas.	33
Figura 17 – Impressora GTMax Core A3 do Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM) da Universidade Federal de Uberlândia	34
Figura 18 – Corpos de prova com seus respectivos desmoldantes antes de serem laminados. Da esquerda para a direita: <i>peelply</i> , cera automotiva, sem desmoldante	35
Figura 19 – Corpos de prova em negativo de semicírculos já laminados. Da esquerda para a direita: <i>peelply</i> , cera automotiva, sem desmoldante	36
Figura 20 – Demonstração do rabo de andorinha e molde encaixado	36

Figura 21 – Peças a serem encaixadas no tubo e fixadas no molde para garantir a centralização do compósito na peça final	37
Figura 22 – Molde fechado pronto para esperar o tempo de cura.....	38
Figura 23 – a) Condição dos componentes pós desmolde; b) Condição da peça pós desmolde	38
Figura 24 – a) Massa de fibra de carbono utilizada; b) Resultado da laminação com o molde fixado internamente.....	39
Figura 25 – Setup utilizado para os ensaios de tração no Laboratório de Projetos Mecânicos da Universidade Federal de Uberlândia.	40
Figura 26 – Desenho técnico da impressão 3D do corpo de prova utilizado nos testes de tração.....	41
Figura 27 – <i>Setup</i> utilizado para o ensaio de tração.....	41
Figura 28 – Curvas obtidas através dos ensaios experimentais de tração.....	42
Figura 29 – Setup utilizada na Máquina de Ensaio Universal para realizar o ensaio de flexão segundo recomendações da ASTM-D790	43
Figura 30 – Curvas obtidas através dos ensaios experimentais de flexão	44
Figura 31 – Esquematização das etapas da simulação no Ansys Workbench.....	45
Figura 32 – a) Geometria da fibra modelada; b) Geometria do molde.....	46
Figura 33 – a) Malha da fase de fibra b) Malha do molde.....	46
Figura 34 – Configurações utilizadas na modelagem do material compósito na ferramenta Ansys ACP	47
Figura 35 – Pontos de aplicação da força e engaste do modelo.	48
Figura 36 – Condições de contorno utilizadas na simulação	48
Figura 37 – Comparação entre curvas obtidas através dos ensaios de tração e análise de elementos finitos.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das fibras de carbono para cada processo de fabricação .	19
Tabela 2 – Propriedades de compósitos com matriz epóxi reforçados com diferentes tipos de fibras (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).....	19
Tabela 3 – Comparação entre dois modelos de marcas distintas (Quickie e Top-End) para cadeiras com a mesma finalidade (Tênis em cadeira de rodas)	29
Tabela 4 – Comparação entre o mesmo modelo de cadeira de rodas equipada ou não com peças em fibra de carbono e possibilidades de customização .	30
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do sistema de resina epoxy AR320HV com o endurecedor AH320.	35
Tabela 6 – Dados obtidos no ensaio de tração das amostras de polímero reforçado com fibra de carbono.....	42
Tabela 7 – Tabela com as propriedades utilizadas e obtidas a partir do ensaio de flexão	44

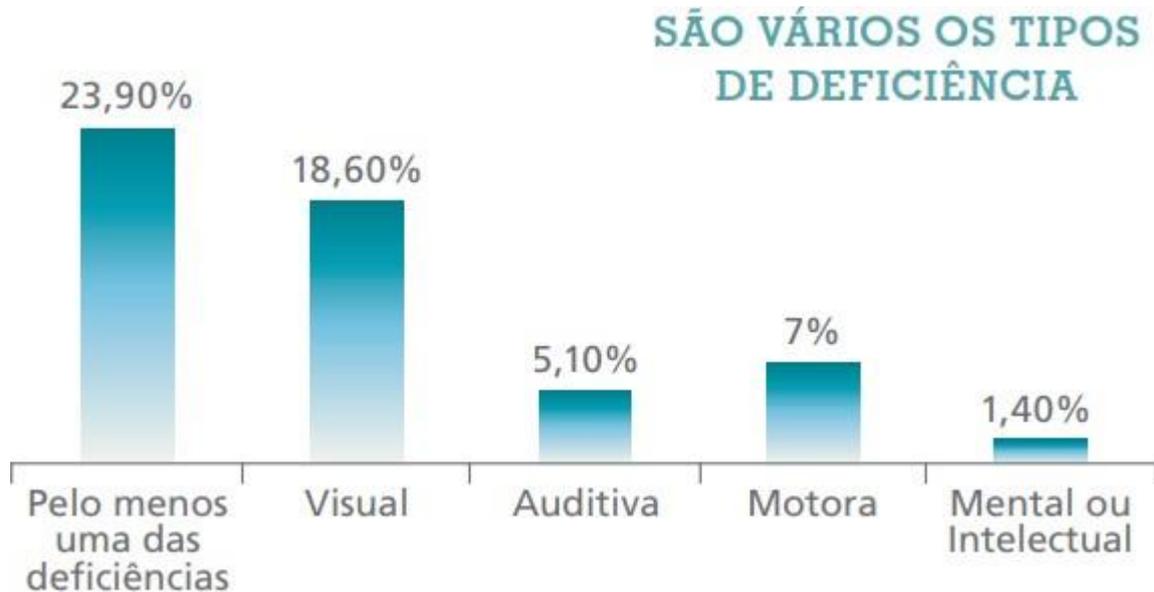
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	15
2.2	A FASE FIBRA E A RESINA EPÓXI	16
2.2.1	Fibra de carbono	18
2.2.2	RESINA EPÓXI	19
2.3	MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS . .	20
2.3.1	Laminação manual	21
2.3.2	Infusão à vácuo (RIFT)	22
2.3.3	Laminação por bolsa de vácuo	22
2.4	MANUFATURA ADITIVA	24
2.4.1	Modelagem por deposição de material fundido (FDM)	25
2.4.2	Utilização de moldes para a criação de componentes de fibra de carbono	26
2.5	ANÁLISE POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	26
2.6	APLICAÇÕES DE PEÇAS DE FIBRA DE CARBONO EM CADEIRAS DE RODAS	27
2.6.1	Cadeiras de rodas comerciais	28
2.6.2	Patentes	31
3	DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS TUBULARES EM FIBRA DE CARBONO	34
4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA FIBRA DE CARBONO 40	
4.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO	40
4.2	ENSAIOS DE FLEXÃO	43
5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CORPO DE PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO DE TRAÇÃO	45
6	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) por meio do Censo demográfico de 2010 existem, no Brasil, cerca de 46 milhões de pessoas (23,9 % da população) que possuem algum tipo de deficiência, seja ela auditiva, visual, mental ou motora, como mostra a Figura 1 .

Figura 1 – Gráfico de pessoas com deficiência no Censo de 2010



Fonte: De Oliveira (2012)

É inegável que as pessoas com deficiência (PCD) possuem grandes dificuldades de socialização e inclusão na sociedade, como estar posicionado no mercado de trabalho, em grupos sociais distintos e diversos outros ambientes. Dessa forma, dentre as várias ações realizadas para a inclusão, fortalece-se aquela por meio do esporte (FARIA; CARVALHO, 2010).

O esporte paralímpico teve seu início fortemente atrelado a um caráter reabilitador, tanto médico quanto psicológico, em 1944 na Segunda Guerra Mundial (SCHEID; ROCHA, 2012). Após esse movimento, o neurologista Ludwig Guttmann iniciou trabalhos de reabilitação por meio do esporte com lesionados modulares na Inglaterra, buscando na atividade física novos caminhos para facilitar a integração dessas pessoas na sociedade maximizando as capacidades das pessoas com deficiência por meio do esporte (CIDADE; FREITAS, 2002).

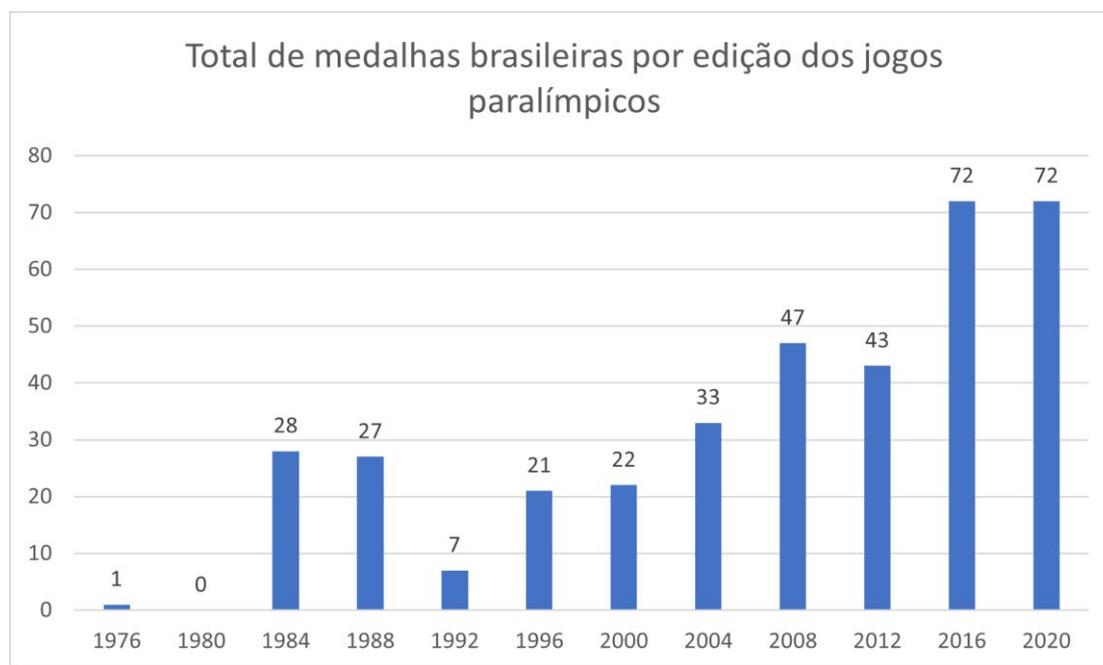
No Brasil, o esporte paralímpico teve como seu precursor Robson de Almeida, um portador de paraplegia que fundou, no Rio de Janeiro, o Clube do Otimismo - primeiro no Brasil para esportes desse gênero. O início foi difícil, já que obtinham resultados expressivos (em número de adeptos) em grande centros, porém lento em cidades do interior (BRAZUNA; CASTRO, 2001sou).

A primeira paralimpíada foi realizada em 1960, na cidade de Roma tendo a participação de 23 países e 400 atletas portadores de deficiência. A primeira participação brasileira contou apenas com atletas da modalidade de bocha (sem medalhas), em 1972 na Alemanha. Já em 1976, em sua quinta edição, o país obteve suas primeiras medalhas de prata com os atletas Robson de Almeida e Luis Carlos Curtinho (CPB, 2021).

O Comitê Paralímpico Brasileiro (CPB) foi fundado no dia 9 de fevereiro de 1995 com o intuito de investir esforços na ampliação visibilidade ao esporte paralímpico no país (CPB, 2021). Em 2001 foi sancionada a Lei Agnelo/Piva, fundamental no desenvolvimento do esporte adaptado no Brasil. A legislação estabelece o repasse de parte da arrecadação das loterias federais para os comitês olímpico e paralímpico. Esta verba proporcionou ao paradesporto nacional avanços estruturais e técnicos.

Desde então, foi observada uma evolução grande do esporte no país sendo que, nas Paralimpíadas de Tóquio 2022, foram conquistadas 22 medalhas de ouro, 20 de prata e 30 de bronze, a melhor marca até então, como mostrado na Figura 2. Isso se dá devido ao alto investimento em infraestrutura e captação de novos talentos por parte do CPB.

Figura 2 – Histórico de conquista de medalhas da delegação brasileira em jogos paralímpicos desde sua primeira participação



Fonte: CPB (2021)

Um dos grandes marcos de incentivo ao esporte paralímpico no país foi a construção do Centro de Treinamento Paralímpico (Figura 3) localizado no Parque Fontes do Ipiranga, zona sul de São Paulo. O centro tem instalações esportivas *indoor* e *outdoor* que servem para treinamentos, competições e intercâmbios de atletas e seleções em 17 modalidades paralímpicas: atletismo, basquete, esgrima, rúgbi, tênis em cadeira de rodas, bocha, natação, futebol de 5, futebol de 7, goalball, halterofilismo, judô, parabadminton, parataekwondo,

tênis de mesa, triatlo e vôlei sentado. A estrutura ainda conta com alojamentos com capacidade para 300 pessoas, refeitório, lavanderia e um setor administrativo com salas, auditórios e outros espaços de apoio. Uma obra de grande porte, com um investimento de, aproximadamente, R\$ 265 milhões (CTPB, 2021).

Figura 3 – Centro de Treinamento Paralímpico, fundado em 2016 na cidade de São Paulo.



Fonte: CTPB (2021)

Alguns projetos do CPB tem como objetivo o desenvolvimento e incentivo de novos atletas. Em 2018, foram desenvolvidos projetos como Escola Paralímpica de Esportes, que oportunizou o primeiro contato de crianças com o esporte adaptado. Outras iniciativas, como o Camping Escolar Paralímpico, foram colocadas em prática. O Festival Dia do Atleta Paralímpico, em 22 de setembro de 2018, reuniu mais de sete mil crianças em 48 núcleos, por todos os estados do país, em ação inédita de expansão do Movimento pelo Brasil (CTPB, 2021).

Assim como todo esporte de alto rendimento, os esportes paralímpicos são muito influenciados pelos equipamentos utilizados pelos atletas. No caso das cadeiras de rodas, aquelas que são utilizadas no cotidiano não disponibilizam o alto rendimento que um atleta necessita, sendo necessário realizar aportes de tecnologia assistiva para essa finalidade (AUTHIER et al., 2007).

Diferentemente dos esportes olímpicos, a tecnologia assistiva deve ser voltada, especialmente, visando atender às necessidades individuais de cada atleta, já que existem diversas categorias com diversos tipos de deficiência em apenas uma modalidade. De toda forma, é muito importante que esses avanços tecnológicos busquem o desempenho do atleta, mas não negligenciando a segurança e o conforto do equipamento.

Dessa maneira, é necessário realizar a integração de diversas tecnologias para a fabricação de equipamentos para esportes paralímpicos, cujo avanço tecnológico segue os caminhos de (COWAN et al., 2012).

- a) Aprimoramento da interface dos usuários com os dispositivos assistivos;
- b) Aperfeiçoamento dos aspectos construtivos (mecânico e eletrônico) dos dispositivos;
- c) Valorização da autonomia da pessoa com deficiência, ampliando o controle do usuário sobre o dispositivo.

Se tratando de alto rendimento, estudos realizados demonstram a grande influência das inovações tecnológicas no esporte paralímpico. O objeto mais estudado são as cadeiras de rodas e as próteses, que são utilizadas principalmente no atletismo, basquete, rugby, tênis e tênis de mesa (COWAN et al., 2012).

Vanlandewijck, Theisen e Daly (2001), destacam importantes resultados esportivos além da prevenção de lesões em estudos sobre a biomecânica da propulsão em cadeiras de rodas esportivas.

Paciorek e Jones (2001) perceberam que em provas nas quais a cadeira de rodas era utilizada, os atletas que utilizavam os equipamentos mais tecnológicos obtiveram melhores resultados.

Com o objetivo de desenvolver um banco fixo para atletas com uma disfunção elevada do tronco, da categoria PR1 de remo indoor, Eikevåg et al. (2022) identificaram que, se combinado o ajuste biomecânico ideal para o atleta seguido por soluções de design para otimizar o ajuste, os resultados demonstram uma melhora significativa da performance em termos de trabalho. Essa melhora demonstrou um acréscimo de força e potência de 47,6 % além de ser utilizado para quebrar o recorde da modalidade com 13 segundos de diferença da antiga marca.

Diante desse cenário, atentando-se à conjuntura que cerca a importância do projeto de equipamentos que auxiliem na melhora do desempenho de atletas no esporte paralímpico, manifesta-se a problemática presente nesta pesquisa, que busca desenvolver uma metodologia de fabricação de tubos em fibra de carbono a partir de moldes feitos em manufatura aditiva.

Inicialmente, no capítulo 2, serão evidenciadas as características e a importância dos materiais compósitos no mercado de engenharia como um todo, com um enfoque na utilização de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono. Além disso, serão apresentadas as principais técnicas de laminação desse tipo de compósito e o seu processo de fabricação. Ainda no segundo capítulo serão apresentados alguns exemplos de patentes que utilizam esse tipo de compósito em cadeiras de rodas de alto rendimento, além de uma comparação de valores das cadeiras de rodas mais vendidas no mercado.

No terceiro capítulo serão apresentados os testes realizados para o desenvolvimento de peças tubulares em fibra de carbono.

No quarto capítulo, será apresentada a caracterização mecânica da fibra de carbono a partir de ensaios de tração segundo a norma ASTM D3039 e flexão segundo a norma ASTM D790, além dos resultados obtidos.

No quinto capítulo será feita a apresentação da simulação computacional feita a partir do *software* Ansys e seu módulo ACP, além de um comparativo do resultado obtido com o resultado experimental.

No capítulo 6 serão comentadas as conclusões obtidas no desenvolvimento do projeto, além de sugestões para trabalhos futuros.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia de fabricação de tubos em fibra de carbono a partir de moldes feitos em manufatura aditiva.

Os objetivos específicos são:

- Projetar os moldes para a fabricação das peças tubulares;
- Fabricar os moldes em manufatura aditiva;
- Fabricar as peças tubulares em fibra de carbono e determinar a metodologia mais adequada às condições disponíveis;
- Avaliar as propriedades da fibra de carbono por meio dos ensaios de tração e flexão;
- Simular numericamente pelo método de elementos finitos as amostras testadas no ensaio de tração, comparar seus resultados e validar o modelo numérico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

A utilização de materiais compósitos no ramo da engenharia vem sendo difundida de forma ampla nos últimos anos. Isso se dá pela capacidade desses materiais em possuir propriedades mecânicas diversas aliadas à uma elevada razão resistência mecânica em relação à massa (ATTAF, 2013). Algumas das indústrias que mais utilizam esse tipo de material são: automotiva, aeroespacial, energias renováveis, marítima, civil, mecânica, micro/nano tecnologia, medicina, entre outras, o que evidencia a versatilidade e a aplicabilidade dos mesmos.

Segundo a Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO), a indústria brasileira consumiu, em 2020, cerca de 208 mil toneladas de materiais compósitos, o que representa um faturamento de R\$ 2,9 bi, 3,9 % acima do valor de 2019 (BERNARDINO, 2022).

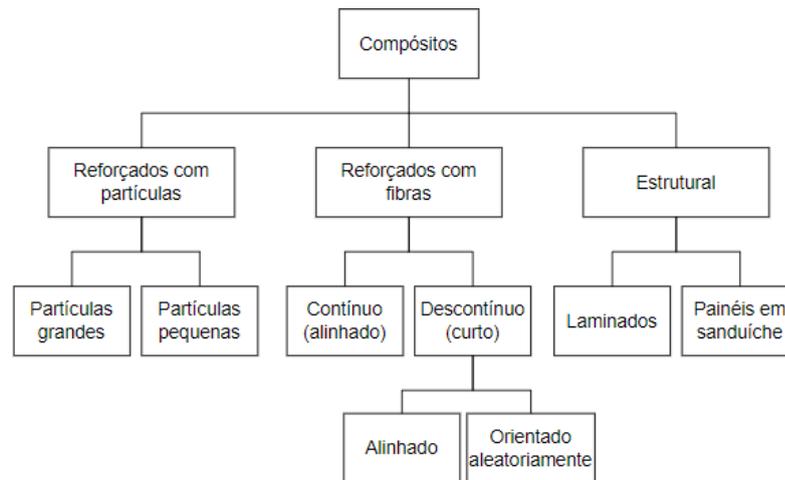
Materiais compósitos são aqueles que são multifásicos e possuem as propriedades e características de ambas as fases que o constituem, com o objetivo de encontrar a melhor combinação de propriedades para a aplicação requerida (STRONG, 2008). A maioria desses materiais são compostos por apenas duas fases. Uma das fases é a matriz, que é contínua e utilizada como um envolvente da segunda fase, chamada de dispersa, que é descontínua e, normalmente, composta por partículas de diferentes geometrias, tamanhos e propriedades (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Como forma de classificação dos compósitos, esses foram divididos em três grupos: reforçados com partículas, reforçados com fibras e estruturais. Além disso, a classificação possui ramificações, como por exemplo o tipo de material de reforço, propriedades mecânicas, formas que são processados, orientação e distribuição do reforço, entre outros. O esquema de classificação dos materiais compósitos pode ser visualizado na Figura 4

Os compósitos reforçados com fibras, que serão utilizados neste trabalho, podem ser caracterizados pela porção dispersa possuir a geometria de uma fibra, ou seja, uma grande razão entre comprimento em relação ao diâmetro. Eles são atrativos pois podem ser projetados de forma a ser escolhida a orientação das fibras de acordo com a necessidade do projetista, incluindo a possibilidade de mesclar as orientações através da laminação de camadas. Além disso, as fibras possuem alta resistência à tração longitudinal, com valores maiores que 1000 MPa ($\sigma_T > 1000MPa$) e uma baixa massa específica ($< 2g/cm^3$), propriedades interessantes para um projeto mecânico (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Quando a matriz de material compósito é fabricada de material polimérico, pode-se dar o nome de Polímero Reforçado com Fibras, ou *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*, como é mais comumente chamado. Muito utilizados na engenharia estrutural, os FRP's mais comuns são aqueles compostos de fibras de vidro, carbono ou Kevlar dispostas sob uma

Figura 4 – Esquema de classificação dos materiais compósitos.



Fonte: Callister Jr e Rethwisch (2020)

matriz epóxi ou poliéster (MASUELLI, 2013).

Os polímeros podem ser classificados de acordo com a influência da temperatura em suas características e se diferem em termorrígidos ou termoplásticos (CANEVAROLO JR, 2002). Os polímeros termoplásticos e termorrígidos são os polímeros que quando elevadas pressão e temperatura, amolecem e fluem, o que torna possível a modelagem destes plásticos já que após a retirada destas condições, se solidificam assumindo a forma do molde. Porém, a diferença entre eles está na segunda aplicação das condições citadas, já que os termoplásticos permitem a remodelagem do material e os termorrígidos não, ou seja, uma reação irreversível (DE PAOLI, 2009).

Esses fatores influenciam diretamente no âmbito dos materiais compósitos pois as resinas termorrígidas são mais fáceis de processar já que apresentam uma certa compatibilidade com os reforços fibrosos (SOUZA et al., 2013). O tipo de resina a ser utilizado deve ser escolhido com base nos fatores e condições de trabalho da peça, pois suas propriedades mecânicas e características são alteradas com as condições do ambiente, como temperatura, pressão, umidade, entre outros (SOUZA et al., 2013).

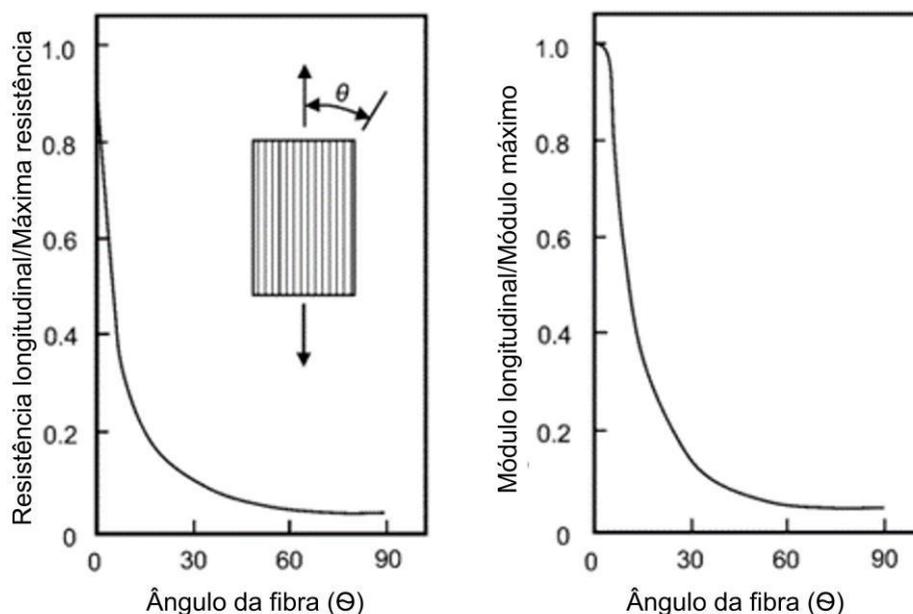
2.2 A FASE FIBRA E A RESINA EPÓXI

A fase fibra é, na maioria das vezes, de um material frágil mas que quando transformado em fibra (com um diâmetro muito menor que seu comprimento) se torna mais resistente que o material bruto (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020). Por isso, à medida em que as fibras vão se tornando mais finas, elas tendem a apresentar um menor número de defeitos que podem levar à falhas, se aproximando mais da resistência teórica do material (BAKER, 2004).

Outro fator que influencia na resistência e rigidez do FRP é a orientação das fibras

do material compósito em relação à direção da carga aplicada. Quando o carregamento é aplicado na direção das fibras (0°), o material possui sua resistência e rigidez máximas, ou seja, o mais próximo possível da nominal. Por outro lado, quando aplicado na direção transversal de orientação das fibras, sua resistência cai drasticamente (CAMPBELL, 2010), como mostrado na Figura 5.

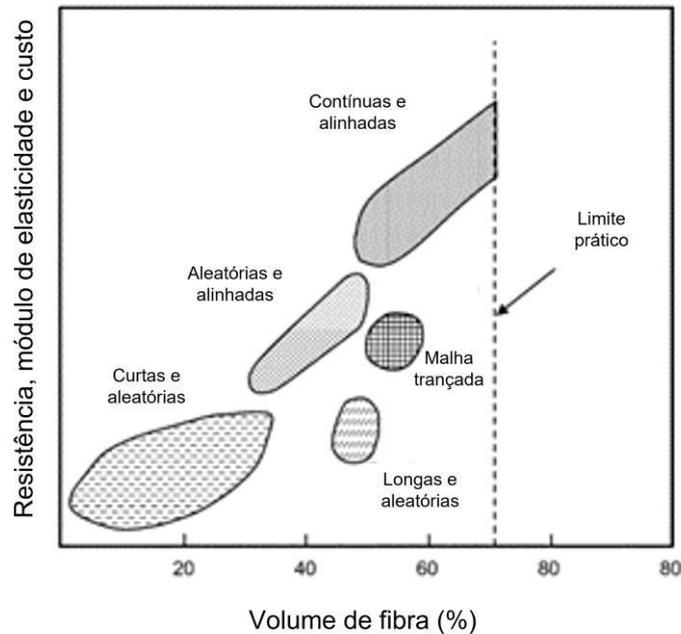
Figura 5 – Influência do ângulo de carregamento resistência e rigidez de um reforço fibroso.



Fonte: Campbell (2010)

Por fim, o último fator de influência das fibras em um FRP são a quantidade e o tipo de reforço da peça. Segundo Campbell (2010), existe um limite de 70 % em volume de reforço para formar um compósito. Isso ocorre pois, com porcentagens mais elevadas, não há matriz suficiente para que haja um suporte eficaz das fibras. A disposição física das fibras (contínua e descontínua) também tem grande influência e deve ser pensada na fase de projeto para a melhor aplicação. Os compósitos de fibra descontínua são menos utilizados pois é difícil manter um bom alinhamento entre eles na prática e, por isso, utiliza-se mais os compósitos de fibra contínua, já que geralmente a direção do carregamento é conhecida (PEREIRA, 2013). Na Figura 6 é possível relacionar a porcentagem de volume da fibra e a resistência mecânica, o módulo de elasticidade e o custo.

Figura 6 – Relação de porcentagem de fibra e disposição física com a resistência, elasticidade e custo dos compósitos.



Fonte: Campbell (2010)

2.2.1 Fibra de carbono

As fibras de carbono estão sendo amplamente utilizadas como reforço para compósitos na indústria devido aos seguintes fatores (UUSITALO, 2013; CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020):

- possuem elevado módulo de elasticidade e resistência específica;
- não são afetadas pela umidade e, portanto, não sofrem corrosão em temperatura ambiente;
- retêm suas características mais importantes mesmo a temperaturas elevadas;
- seus compósitos possuem uma ótima relação custo-benefício, obtendo um material de alta performance com uma redução de massa de mais de 50 % quando comparado a um aço de alta resistência.

As fibras de carbono podem ser obtidas através de três materiais e processos diferentes: rayon, poliácridonitrila (PAN) e piche líquido. A matéria prima que é predominantemente utilizada é a PAN, que sofre um processo de carbonização sendo gerado um emaranhado de fibrilas de grafite turboestrático com planos basais tendendo a alinhar-se no eixo da fibra. Tal morfologia dá origem a um módulo de elasticidade na faixa de 200 - 390 GPa - paralelo ao eixo longitudinal da fibra - e 20 GPa - na direção normal ao eixo longitudinal (CHANDRASHEKHARA et al., 2005). A Tabela 1 mostra a comparação entre propriedades das fibras de carbono em relação aos processos de fabricação.

Tabela 1 – Propriedades das fibras de carbono para cada processo de fabricação

Matéria prima	Propriedade		
	Tensão de ruptura [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Deformação até a ruptura [%]
-			
Rayon	600 - 1300	41	2,5
PAN	2400 - 3200	230 - 390	1,6
Piche líquido	2800 - 3500	244 - 662	0,9

Fonte: Chung (2012)

Por fim, quando comparada à outros tipos de reforços estruturais, a fibra de carbono apresenta grande vantagem pelas propriedades mecânicas oferecidas em função da massa específica, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades de compósitos com matriz epóxi reforçados com diferentes tipos de fibras (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020)

Propriedade	Fibra de vidro	Fibra de carbono (Alta resistência)	Fibra de Aramida (Kevlar 49)
Densidade relativa (g/cm ³)	2,1	1,6	1,4
Módulo de tração	-	-	-
Longitudinal (GPa)	45	145	76
Transversal (GPa)	12	10	5,5
Limite de resistência à tração	-	-	-
Longitudinal (MPa)	1020	1240	1380
Transversal (MPa)	40	41	30
Deformação no limite de resistência à tração	-	-	-
Longitudinal	2,3	0,9	1,8
Transversal	0,4	0,4	0,5

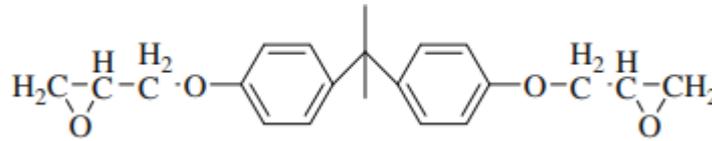
Fonte: Callister Jr e Rethwisch (2020)

2.2.2 RESINA EPÓXI

As resinas epóxi foram introduzidas no mercado em meados do século XX foram consideradas um avanço em relação às resinas termorrígidas existentes, como a poliéster e a fenólica. Desde então, esse tipo de resina vêm sendo amplamente utilizada em diversas aplicações, como a confecção de placas de circuito impressas, envasamento de componentes, revestimentos de superfície, além do reforço de compósitos com fibras (MENDONÇA, 2005).

O termo epóxi é utilizado para descrever o anel oxirano que consiste em um composto monocíclico com um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, formando um anel. Sua estrutura química geral pode ser observada na Figura 7.

Figura 7 – Estrutura química de uma resina epóxi não curada.



Fonte: Zeng et al. (2010).

Como pontos positivos, esse tipo de resina possuem excelentes resistências química e à corrosão, propriedades mecânicas superiores às demais, além da facilidade de manipulação (ATHAWALE; ALHOUSAMI, 2009). Além disso, quando comparadas à outros tipos de polímeros, pode-se citar algumas vantagens (PETERS, 2013):

- Controle dimensional de mais fácil alcance, já que possuem uma baixa contração relativa após a cura;
- Não há a possibilidade de geração de bolhas ou vazios indesejados no compósito;
- Possui excelente adesão na maioria das fibras, já que é de natureza polar;
- Resistência à corrosão em ambientes hostis, aquosos ou não.

Um fator que influencia diretamente no desempenho desse tipo de resina é a sua temperatura máxima de serviço, que se baseia no conceito de temperatura de transição vítrea (T_g) (HAYES et al., 2000). Tal temperatura é um comportamento típico dos polímeros no qual o material não é fundido, mas ocorre uma mudança do estado vítreo para um estado flexível e dúctil, chamado de borrachoso (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Alguns fatores influenciam diretamente na temperatura de transição vítrea. Temperatura e/ou tempo de cura insuficientes podem resultar em uma menor T_g devido ao menor grau de reticulação da cadeia polimérica (BARTON, 1985). Além disso, a umidade tem um papel fundamental, já que a água dá origem a um efeito plastificante entre as cadeias de polímeros e, isso resulta na diminuição dessa temperatura. Graças à essas interferências, é extremamente importante monitorar o processo de cura e controlar o ambiente de produção (CHUNG, D., 2017).

2.3 MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Atualmente existem diversos tipos de métodos de fabricação e laminação de materiais compósitos, sendo que os mais comuns são: laminação manual, infusão à vácuo (RIFT - *Resin Infusion under Flexible Tooling*), pré-impregnado e moldagem por transferência de resina (RTM - *Resin Transfer Molding*).

Os métodos de fabricação de materiais compósitos variam dependendo do tipo de reforço utilizado, do tipo de resina e da forma desejada da peça final. Cada método tem

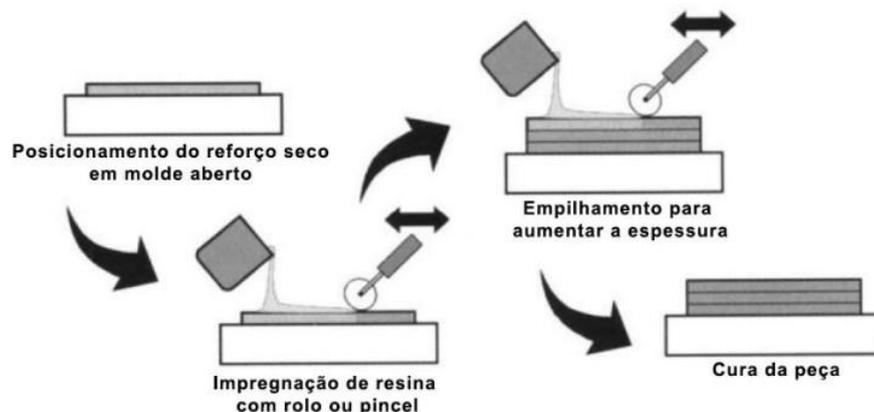
suas próprias vantagens e desvantagens, e o método escolhido dependerá das necessidades específicas da peça a ser fabricada.

2.3.1 Laminação manual

A laminação manual, ou *hand lay up*, é um processo de fabricação de peças de compósito que envolve a aplicação manual de camadas de reforço, geralmente feitas de fibra de vidro ou carbono, em uma resina termoestruturante, como mostrado na Figura 8. O processo é realizado em um molde aberto e pode ser utilizado para fabricar peças de grandes dimensões e em pequena escala. É comumente utilizado na indústria náutica, aeroespacial e de construção de veículos (BELINGARDI; CAVATORTA; PAOLINO, 2008).

Inicialmente, é feito um molde seco (normalmente uma placa de madeira de espessura baixa) para que a resina seja impregnada com rolo, pincel ou espátula. Após esse processo, é iniciada a sobreposição de tecidos de fibra de carbono, camada por camada, até atingir o número alvo. Após o número de camadas desejado ser atingido, retira-se o excesso de resina com uma espátula e a peça é deixada em temperatura ambiente para realizar o processo de cura.

Figura 8 – Desenho esquemático do processo de laminação manual de peças de polímeros reforçados por fibras de carbono.



Fonte: Campbell (2010).

Esse tipo de laminação é geralmente mais econômica do que outros processos de fabricação de compósitos, como a infusão a vácuo ou a compressão a quente, mas requer mais trabalho manual e um maior grau de habilidade para obter resultados de alta qualidade (CAMPBELL, 2010).

Por esse processo ser realizado manualmente, a resina utilizada na matriz é normalmente de baixa viscosidade para facilitar a aplicação. Além disso, as resinas geralmente curam à temperatura ambiente, o que elimina a necessidade de usar estufas para po-

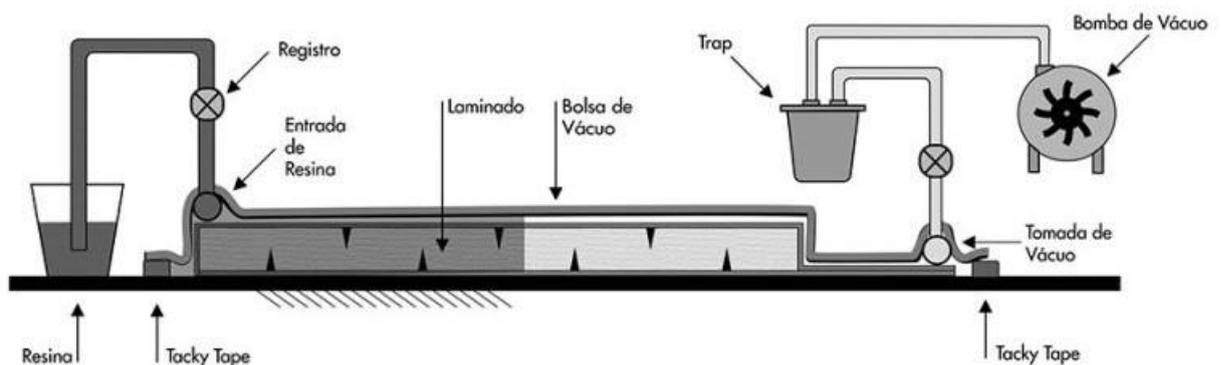
limerização, podendo minimizar o custo final da peça (BELINGARDI; CAVATORTA; PAOLINO, 2008).

2.3.2 Infusão à vácuo (RIFT)

O processo de infusão a vácuo, também conhecido como RIFT ou RI (*Resin Infusion*), é um método de fabricação de peças de compósito que foi originalmente desenvolvido para produzir peças de médio ou grande porte, como cascos de barcos. Ele é uma variação do processo de *Resin Transfer Moulding*, em que uma das metades do molde é substituída por um filme impermeável e flexível, o que reduz significativamente os custos com ferramentais. Este processo é conhecido por vários nomes, e pode haver pequenas variações entre os diferentes processos (WILLIAMS; SUMMERSCALES; GROVE, 1996).

O processo de infusão de resina é iniciado na preparação do molde, geralmente consistindo em duas metades que podem ser separadas para liberar a peça final. A estrutura de reforço é posicionada no molde, em uma das metades e uma folha de filme impermeável é colocada sobre a outra metade do molde, formando uma câmara de vácuo. Dessa forma, a resina é colocada em um recipiente externo e aquecida até a temperatura de trabalho. O vácuo é aplicado na câmara do molde, criando uma pressão negativa que ajuda a infundir a resina na estrutura de reforço. O processo pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Desenho esquemático do processo de infusão à vácuo de peças de polímeros reforçados por fibras de carbono.



Fonte: Composites (2020a)

Após o molde ser aberto e a peça desmoldada, a resina é permitida curar, geralmente à temperatura ambiente ou em uma estufa, até atingir a resistência final.

2.3.3 Laminação por bolsa de vácuo

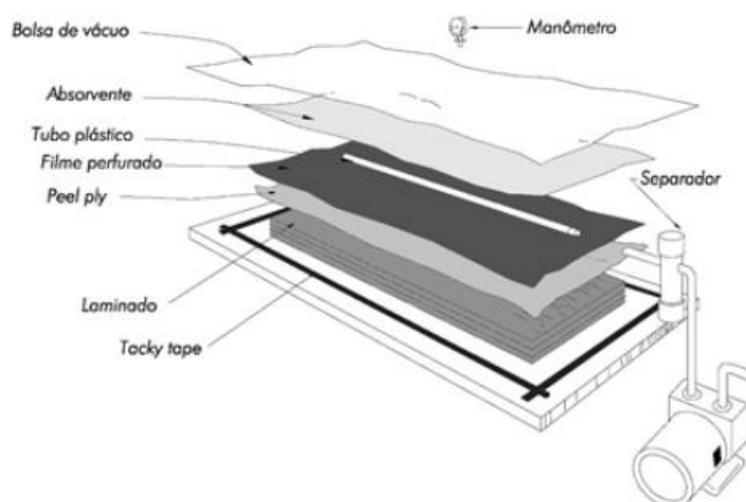
A laminação com bolsa de vácuo ou *vacuum bag* é um método de fabricação de peças de compósito que utiliza vácuo para pressionar a camada de reforço contra o molde

durante o processo de cura da resina. Este processo é capaz de produzir laminados mais leves e mais fortes do que a laminação manual, e pode ser utilizado para fabricar peças sólidas ou para colar materiais sandwich (CAMPBELL, 2010).

O processo consiste em posicionar a estrutura de reforço no molde, aplicar resina manualmente sobre a estrutura e cobrir tudo com uma bolsa plástica, que é conectada a uma bomba de vácuo para remover o ar da cavidade do molde. As pressões utilizadas geralmente variam entre 0,4 e 0,6 atm.

Nesse processo de laminação (Figura 10), são utilizados alguns materiais descartáveis entre o laminado e a bolsa de vácuo para garantir o sucesso do processo. O *peel ply* é um tecido de poliamida que é colocado em contato direto com o laminado e tem a função de facilitar a retirada dos outros materiais descartáveis após o processo de cura. O filme perfurado é colocado acima do *peel ply* e é usado para controlar a passagem de resina durante o processo. Ele permite que uma quantidade ligeiramente maior de resina seja utilizada do que o projetado para facilitar a impregnação inicial, mas deve ser retirado durante a aplicação de vácuo. Um material absorvente chamado *breather* é colocado após o filme perfurado. Ele tem a função de absorver qualquer excesso de resina que o filme perfurado permitiu passar e de homogeneizar a distribuição de vácuo. Após isso, a bolsa de vácuo é fechada e fixada no molde com a *tacky tape*, uma fita emborrachada dupla face com cerca de 12 mm de largura, que é utilizada para prender a bolsa de vácuo ao molde (COMPOSITES, 2020b).

Figura 10 – Desenho esquemático do processo de laminação com a utilização de *vacuum bag*.



Fonte: Composites (2020b)

Todavia, esse processo de fabricação de materiais compósitos possui um custo elevado quando comparado ao processo de laminação manual quando levado em conta apenas os materiais utilizados. O processo de laminação manual custa, em média, R\$

3,00/kg e, o por *vacuum bag* R\$12,00/kg.

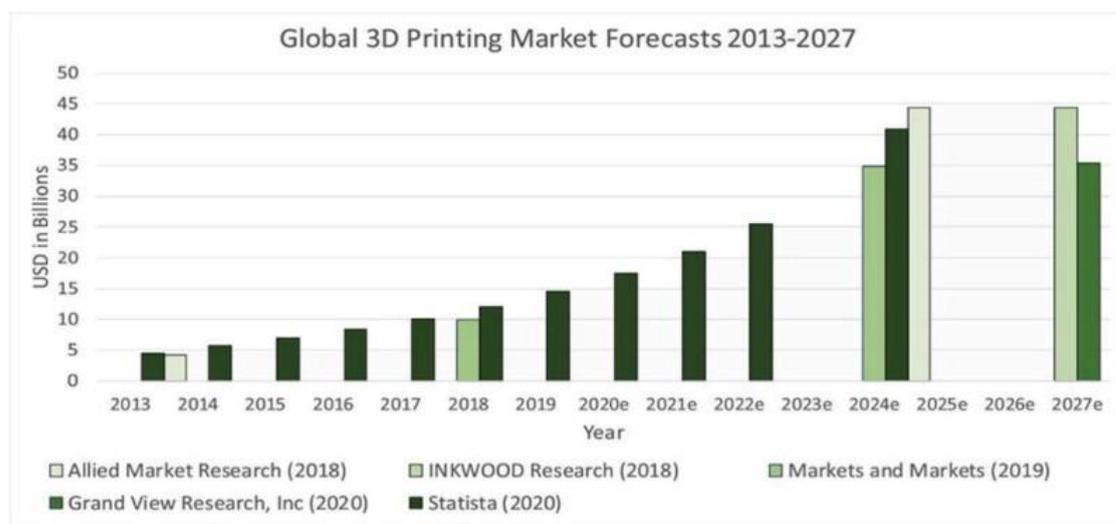
2.4 MANUFATURA ADITIVA

O processo de Manufatura Aditiva (MA) foi inicialmente apresentado por Charles Hull, patenteando o processo de fabricação SLA, chamado no Brasil de estereolitografia (TAMEZ; TAHA, 2021). Inicialmente, esse processo foi chamado de RPM (Rapid Prototyping and Manufacturing) e é utilizado na indústria para descrever os processos de fabricação que possibilitem a rápida criação de um protótipo (GIBSON, 2010).

A fabricação de protótipos, modelos, moldes e peças por meio dos processos de Manufatura Subtrativa (MS) possui um alto custo devido ao elevado tempo de usinagem, alta taxa de retrabalho e, principalmente, desperdício de materiais (HEINZL; HERTZ, 1985). Dessa forma, o processo de MA foi inovador pois consiste na adição de material ao invés de subtraí-lo de um bloco. Essa diferença conseguiu reduzir tempo, custo, além da maior capacidade em produzir geometrias complexas e possuir uma maior flexibilidade de produção.

Todas essas vantagens são evidenciadas nos números do mercado global de impressões tridimensionais que mostram um crescimento de 12 a 17 % na receita por ano e uma previsão de faturamento de 44,6 bilhões de dólares até o fim do ano de 2027 (TAMEZ; TAHA, 2021), como mostrado no gráfico da Figura 11 .

Figura 11 – Crescimento estimado do mercado global de impressão 3D.



Fonte: Tamez e Taha (2021).

Todavia, é importante ressaltar que apesar de todas as vantagens descritas acima, a maioria dos componentes produzidos por meio de MA não permitem a fabricação de peças com propriedades físicas e mecânicas tão interessantes quanto àquelas fabricadas em processos convencionais de fabricação.

Atualmente no mercado existem alguns métodos de manufatura aditiva, sendo eles (GARCIA, 2016):

- **Sinterização/Fusão Seletiva a Laser (SLS/SLM):** utilizado com frequência em pós cerâmicos (ou ligante entre estes) que são pré-sinterizados por incidência de laser;
- **Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS):** processo de manufatura aditiva de compostos densos de metal, com boas propriedades metalúrgicas. Realizado por meio do pó metálico que é fundido por meio da incidência do laser;
- **Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM):** camadas de material em forma de bobinas de papel laminado com cola que, ativada por aquecimento sofrem uma sequência de cortes e são unidas para tomar a forma desejada;
- **Estereolitografia (SLA):** processo no qual uma plataforma móvel permite a criação de protótipos através de uma resina fotosensível. A resina é solidificada por camadas por meio de uma fonte de raio ultravioleta de alto foco;
- **Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM):** quando ocorre a extrusão em camadas de uma massa cerâmica que se volatiliza parcialmente entre as deposições, aderindo à camada subsequente e dando ao modelo uma estabilidade dimensional;
- **Impressão 3D por Jato de Tinta (3DP):** método no qual é empregado o spray de ligante sobre materiais pós-cerâmicos;
- **Consolidação Ultrassônica (UC):** combinação de solda de metais por ultrassom e, posteriormente, o fresamento CNC dos materiais indesejados.

2.4.1 Modelagem por deposição de material fundido (FDM)

O processo de modelagem por deposição de material fundido (FDM) foi patenteado nos anos 90 com a finalidade de construir um protótipo plástico sem a necessidade de utilização de um molde. As partes foram produzidas separadamente a partir da extrusão de filamentos de termoplásticos usualmente enrolados em carretéis (SHAHRUBUDIN et al., 2019).

Esse processo de MA pode ser usado desde então para a criação de diversos tipos de componentes com uma base sólida além de formas e geometrias complexas (SAVU et al., 2019). Todavia, ainda existem desafios no mercado de produção de peças por FDM que são: baixa produtividade, acabamento superficial de qualidade inferior, instabilidade dimensional e as propriedades mecânicas das peças frente aos métodos de produção convencionais (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSOLOURIS, 2016).

Todavia, o processo de FDM é o processo com melhor custo-benefício no mercado de MA de materiais termoplásticos. Isso se dá pela simplicidade de construção de *hardware* das

máquinas extrusoras (em comparação à de outros processos), pela segurança e simplicidade de operação dos equipamentos.

2.4.2 Utilização de moldes para a criação de componentes de fibra de carbono

A manufatura de moldes é geralmente muito cara. Isso se dá pois as opções de materiais são: fibras de vidro ou moldes de metal. Todavia, para a construção de um molde de fibra de vidro, é necessário um modelo inicial, geralmente feito de espuma poliuretana de alta densidade ou com cortes de madeira em CNC (Controle Numérico por computador), o que encarece o processo.

Portanto, o objetivo da utilização de moldes feitos através de MA é obter um processo de bom custo-benefício e com alta qualidade de moldes. Porém, o maior desafio é conseguir uma boa qualidade no acabamento superficial reduzindo a sua rugosidade.

2.5 ANÁLISE POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O desenvolvimento do Método de Elementos Finitos (MEF) foi iniciado em meados do século XVIII, quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para a resolução de modelos matemáticos. O desenvolvimento prático dessa análise se deu por volta de 1950 com o advento da computação, que tornou viável a resolução de resolução e elaboração de sistemas de equações complexos (GALLAGHER et al., 1975).

Trabalhando em um projeto de aeronaves para a Boeing, em 1956, Martins, Clough, Turner e Topp propuseram um método de análise. Em 1960 o método foi denominado Método de Elementos Finitos e o descreveram. Desde então o seu desenvolvimento e utilização cresceram de forma exponencial, sendo utilizado nos dias de hoje em áreas como a odontologia, medicina e principalmente a engenharia (SABAT; KUNDU, 2021).

Como dito anteriormente, o objetivo do método é a análise de sistemas complexos ou irregulares através de programas computacionais. Para isso, o método considera um sistema como equivalente a um agrupamento de diversos elementos finitos, simplificando a estrutura. Dessa forma, o software responsável impõe que, nos pontos comuns a vários elementos (nós), os deslocamentos são compatíveis às forças internas e, o resultante do agrupamento reage como uma única entidade.

O método de elementos finitos pode ser descrito por (SONG et al., 2004) :

1. A malha na estrutura é gerada;
2. Matrizes de rigidez locais $[k]$ são criadas para cada elemento da malha;
3. Uma matriz de rigidez global $[K]$ é criada pela junção de todas as matrizes de rigidez locais;
4. Os deslocamentos \mathbf{d} dos nós são calculados como:

$$[K]\mathbf{d} = \mathbf{f}$$

Onde \mathbf{f} é o vetor de força

5. O vetor \mathbf{d} é subdividido em subvetores δ , os quais cada um representa o deslocamento dos nós de seus respectivos elementos.
6. O deslocamento em um ponto dentro do elemento é calculado como:

$$\boldsymbol{\mu} = [\mathbf{N}]\delta$$

No qual o vetor $\boldsymbol{\mu}$ representa o deslocamento e $[\mathbf{N}]$ é a matriz dos vetores de forma.

7. As deformações em pontos dentro dos elementos são calculadas como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\mathbf{B}]\delta$$

Onde $[\mathbf{B}]$ é a matriz deformação-deslocamento.

8. As tensões em pontos dentro dos elementos são calculadas como:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\mathbf{E}]\boldsymbol{\varepsilon}$$

Onde $[\mathbf{E}]$ é a matriz de rigidez caracterizando o material.

A matriz de rigidez do elemento, mostrada no passo 2, é definida como:

$$[\mathbf{K}]\mathbf{d} = \mathbf{f}_e$$

Onde \mathbf{f}_e representa as forças atuantes nos nós do elemento. A matriz de rigidez do elemento é:

$$[\mathbf{k}] = \int_{(V)} [\mathbf{B}]^T [\mathbf{E}] [\mathbf{B}] dV$$

Onde V é o volume do elemento.

Para este trabalho, foi utilizado o módulo específico para compósitos do *software* Ansys, o *Ansys Composite PrePost (ACP)*. Com ele é possível definir o número de camadas, forma, espessura e orientação das fibras de cada uma delas, facilitando os processos de otimização de resultados e avaliação do comportamento do compósito.

2.6 APLICAÇÕES DE PEÇAS DE FIBRA DE CARBONO EM CADEIRAS DE RODAS

Por ser um mercado amplo e com muitos consumidores, existem diversas cadeiras no mercado, dos mais variados modelos. Focadas na prática esportiva, no dia-a-dia da pessoa com deficiência, ou de característica mista, ou seja, que se adapta a qualquer ocasião.

Neste tópico serão apresentadas as cadeiras de rodas encontradas no mercado, preços e características, além de algumas patentes registradas de equipamentos desse tipo.

2.6.1 Cadeiras de rodas comerciais

Atualmente existem cadeiras de rodas dos mais variados tipos disponíveis no mercado, sejam elas apenas para locomoção, manuais ou com acionamento eletrônico, ou para a prática esportiva.

Tratando desta vertente, algumas das principais fabricantes de cadeiras de rodas esportivas no contexto internacional são:

- **Quickie:** fabricante estadunidense fundada em 1971. Foi uma das primeiras empresas a fabricar cadeiras de rodas de alta performance para atletas paraolímpicos. Desde então, a Quickie se expandiu e se tornou líder global no setor, oferecendo uma ampla gama de cadeiras de rodas para atender às necessidades específicas de cada indivíduo (WHEELCHAIRS, 2022).
- **Top-end:** é uma marca líder mundial em cadeiras de rodas esportivas e é conhecida por seus produtos de alta performance e inovação. Foi fundada em 1979, em Los Angeles e começou como uma pequena empresa de reparação de cadeiras de rodas, mas rapidamente se expandiu e se tornou conhecida por sua dedicação à fabricação de cadeiras de rodas esportivas de alta qualidade (END, 2022).
- **Invacare:** a marca é líder global na fabricação e distribuição de produtos médicos domésticos inovadores que promovem a recuperação e estilos de vida ativos. Fundada em 1971, na cidade de Elyria, Ohio, EUA, a marca é mais focada em produtos de assistência médica domiciliar do que na prática esportiva (INVACARE, 2022)

Realizando uma pesquisa com as duas maiores fabricantes de cadeiras esportivas anteriormente citadas, Quickie e Top-end, foram comparadas duas cadeiras destinadas à mesma modalidade: o tênis em cadeira de rodas.

A cadeira escolhida da marca Quickie foi a "*Quickie Match Point Ti Sport Wheelchair*" mostrada na Figura 12 (a), uma cadeira que oferece mobilidade e estabilidade ao atleta. Ela contém 5 rodas e ajustes de massa central e elimina os usuais ajustes de posicionamento e movimento. O modelo escolhido da marca Top-End foi a "*T-5 7000 Series*" mostrado na Figura 12 (b). Segundo a fabricante, esse modelo é mais leve e 23 % mais resistente, devido à redução da espessura das paredes dos tubos de alumínio que estavam presentes no modelo anterior da marca.

A análise comparativa para modelos equivalentes de diferentes marcas pode ser vista na Tabela 3. É importante ressaltar que os custos levados em consideração na comparação são aqueles disponibilizados pelo formulário de pedido de cada uma das cadeiras. Além disso, as taxas de importação não foram consideradas, porém é um fator que aumentaria o valor para os atletas nacionais.

Figura 12 – a) Modelo de cadeira *Quickie Match Point Ti*; b) Modelo de cadeira Top-End *T-5 7000 Series*

Fonte: (WHEELCHAIRS, 2022; END, 2021)

Tabela 3 – Comparação entre dois modelos de marcas distintas (Quickie e Top-End) para cadeiras com a mesma finalidade (Tênis em cadeira de rodas)

Quickie MatchPoint Ti			T5 7000 Series Tennis WheelChair		
Valor inicial:	\$ 5051,00	R\$ 25507,55	Valor inicial:	\$ 4073,00	R\$ 20568,65
Assento	\$ 78,00	R\$ 393,90	Estrutura de assento padrão mais resistente:	\$ 602,00	R\$ 3040,10
Estofamento traseiro ADJ Sports	\$ 168,00	R\$ 848,40	Largura entre os joelhos customizável	\$ 54,00	R\$ 272,70
Espaçador de plataforma adaptável (para descanso de pés)	\$ 106,00	R\$ 535,30	Profundidade do assento customizável	\$ 54,00	R\$ 272,70
Eixo Quad QR	\$ 141,00	R\$ 712,05	Altura das costas fixa customizável	\$ 54,00	R\$ 272,70
Aro da roda traseira 24"Spinergy Whl 540 Blk	\$ 944,00	R\$ 4767,20	Altura do assento dianteiro ao chão customizável	\$ 54,00	R\$ 272,70
Aro de mão com cobertura de plástico	\$ 123,00	R\$ 621,15	Altura do assento traseiro ao chão customizável	\$ 54,00	R\$ 272,70
-	-	-	Placa de descanso dos pés telescópica (oferece mais ajustes)	\$ 70,00	R\$ 353,50
-	-	-	Espessura da placa de descanso dos pés customizável	\$ 54,00	R\$ 272,70
-	-	-	Localização customizável do descanso de pés	\$ 54,00	R\$ 272,70
-	-	-	Barra lateral de proteção com altura customizável	\$ 241,00	R\$ 1217,05
-	-	-	Rodas Spinergy XSLX	\$ 1030,00	R\$ 5201,50
-	-	-	Pneus IRC	\$ 151,00	R\$ 762,55
-	-	-	Distância entre pneus customizável	\$ 54,00	R\$ 272,70
Valor total:	\$ 6611,00	R\$ 33385,55	Valor total:	\$ 6599,00	R\$ 33324,95

Fonte: Autor (2023)

Além desta, foi feita uma comparação entre duas versões da mesma cadeira: uma com o máximo de opções disponíveis em fibra de carbono e totalmente customizável e outra padrão, de liga de alumínio. Para esse objetivo, foi utilizada a cadeira "*Eliminator OSR Racing Wheelchair*", da fabricante Top-End. A comparação pode ser visualizada na Tabela 4

Tabela 4 – Comparação entre o mesmo modelo de cadeira de rodas equipada ou não com peças em fibra de carbono e possibilidades de customização

Opção comum - economicamente acessível			Opção com peças em fibra de carbono e customizável		
Valor inicial:	\$ 4697,00	R\$ 23719,85	Valor inicial:	\$ 4697,00	R\$ 23719,85
Garfo em alumínio	\$ -	R\$ -	Garfo em fibra de carbono	\$ 361,00	R\$ 1823,05
Assento em alumínio	\$ 90,00	R\$ 454,50	Assento em fibra de carbono	\$ 301,00	R\$ 1520,05
Espessura superior da estrutura (sem customização)	\$ -	R\$ -	Espessura superior da estrutura (com customização)	\$ 54,00	R\$ 272,70
Espessura inferior da estrutura (sem customização)	\$ -	R\$ -	Espessura inferior da estrutura (com customização)	\$ 54,00	R\$ 272,70
Posição do eixo (medidas padrão)	\$ -	R\$ -	Posição do eixo (medida customizada)	\$ 54,00	R\$ 272,70
Profundidade do cockpit (medidas padrão)	\$ -	R\$ -	Profundidade do cockpit (medida customizada)	\$ 54,00	R\$ 272,70
Comprimento geral (medidas padrão)	\$ -	R\$ -	Comprimento geral (medida customizada)	\$ 54,00	R\$ 272,70
Altura dianteira do assento (medidas padrão)	\$ -	R\$ -	Altura dianteira do assento (medida customizada)	\$ 54,00	R\$ 272,70
Altura traseira do assento (medidas padrão)	\$ -	R\$ -	Altura traseira do assento (medida customizada)	\$ 54,00	R\$ 272,70
Roda dianteira 20" modelo Metal Spoked	\$ -	R\$ -	Roda dianteira 20" modelo Corima carbon fiber	\$ 722,00	R\$ 3646,10
Roda traseira modelo High performance 700C	\$ -	R\$ -	Roda traseira modelo Corima carbon fiber disc 700C	\$ 3004,00	R\$ 15170,20
Valor total	\$ 4787,00	R\$ 24174,35	Valor total	\$ 9463,00	R\$ 47788,15

Fonte: Autor (2023)

Como visto acima, é evidente que o fato da cadeira ser comercializada de forma customizada para cada atleta aumenta o seu valor final. Além disso, quando somadas à adição de peças fabricadas em fibra de carbono, o preço se torna exorbitante, quase impraticável quando trazido às condições financeiras dos atletas brasileiros.

No Brasil existem alguns fabricantes de cadeiras de rodas esportivas, sendo os principais:

- Smart Custom: uma empresa de Goiânia-GO que é focada em consolidar a SMART como uma referência em mobilidade e vida independente (CUSTOM, 2021);
- Ortobras: Há mais de 30 anos, a Ortobras, situada em Barão-RS, cria e desenvolve produtos que proporcionam facilidades, conforto e mais qualidade de vida às pessoas com mobilidade reduzida, produzindo e comercializando uma linha completa de produtos para acessibilidade (ORTOBRAS, 2020);
- Ortomobil: Nasceu em fevereiro de 2016, na cidade de Garibaldi-RS com a missão de trazer novas tecnologias e soluções que satisfaçam as expectativas e necessidades dos clientes. Possuem mais de 15 anos de experiência em conceitos de fabricação e montagem modernos e com ênfase na redução de custos (ORTOMOBIL, 2023).

Porém, verifica-se que no mercado nacional, a parte esportiva do desenvolvimento de cadeiras de rodas ainda não é bem desenvolvida. As empresas citadas acima produzem alguns tipos de cadeiras esportivas, como mostrado na Figura 13, entretanto nenhuma

delas foca na redução de massa e elevação da performance através de peças em fibra de carbono ou parametrização individual. Por serem de alumínio e de fabricantes nacionais, os preços são bem mais acessíveis, mas não podem ser base de comparação com as cadeiras de alto rendimento citadas anteriormente.

Figura 13 – Modelos de cadeiras de rodas esportivas brasileiras. a) MB4 X-Treme - Ortomobil (R\$ 5039,10); b) Cadeira de Rodas Monobloco Sigma Smart Alumínio (R\$ 8091,00); c) Star Lite Premium Ortobrás (R\$ 5850,98)



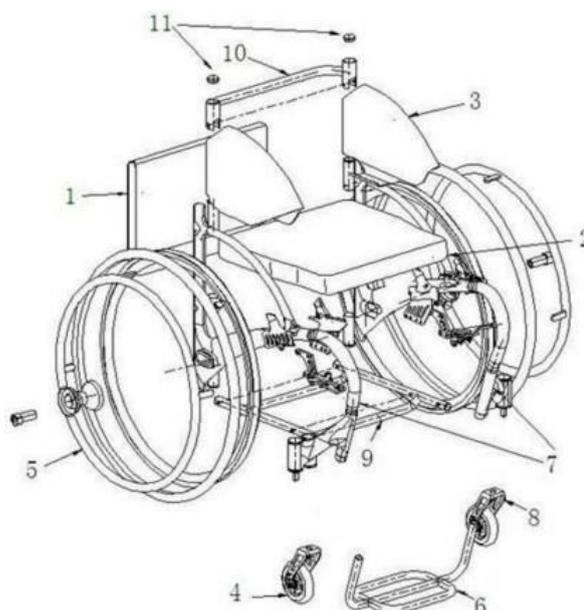
Fonte: Mobility (2023)

2.6.2 Patentes

A patente de número CN208864663U descreve a solução de uma cadeira de rodas (Figura 14) de fibra de carbono que seja leve, com estrutura simples e com vida útil longa. As partes de fibra de carbono seriam: encosto, assento, roda dianteira, roda traseira e pedal, sendo que todas as estruturas estão fixadas ao quadro. Segundo o autor, as vantagens dessa cadeira frente aos modelos comuns é a diferença entre suas massas: enquanto as comerciais pesam de 20 a 40 kg, a de fibra pesa apenas 14 kg, facilitando no transporte e exigindo menos força física do usuário. Além disso, a fibra de carbono tem boa resistência à corrosão, possuindo uma vida útil mais longa do que aquelas de materiais metálicos. Mecanicamente, esse tipo de cadeira possui uma boa resistência à fadiga (500000 ciclos), e uma boa absorção de impactos, com uma carga máxima de utilização de 150 kg (XIMING, 2018).

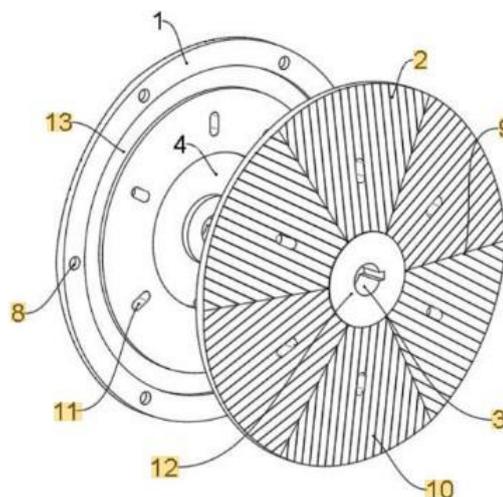
A cadeira de rodas depende do aro da roda para realizar o processo de movimento, além de sua sustentação. Na patente CN217319913U, o autor propõe um aro fabricado em fibra de carbono para garantir a estabilidade estrutural da cadeira de rodas diminuindo a massa e aumentando o seu desempenho. Para isso, o modelo fornece um aro de cadeira de rodas de fibra de carbono montado sobre uma estrutura de material metálico. Quando montados nas duas rodas, isso permite que a cadeira se torne mais leve e seja mais resistente à torção que os modelos comerciais, com raios metálicos, além de ter um comportamento à corrosão melhorado quando comparado aos materiais comumente utilizados (ZHENDONG; QINGHAI, 2022).

Figura 14 – Desenho esquemático de cadeira de rodas de fibra de carbono proposto por CN208864663U



Fonte: Ximing (2018)

Figura 15 – Desenho esquemático de aro da roda de uma cadeira de rodas de alto rendimento proposto por CN217319913U



Fonte: Zhendong e Qinghai (2022)

Normalmente, as cadeiras de rodas para atletas paralímpicos de atletismo, são customizadas individualmente para cada atleta, de acordo com sua deficiência, medidas antropométricas e peso. Dessa forma, isso envolve um alto custo de fabricação e uma exclusividade dos fabricantes, encarecendo ainda mais o processo. Assim, é improvável que alguém que queira experimentar corrida em cadeira de rodas encontre um aparelho adequado às suas necessidades, a menos que precise de um e enfrente os altos custos envolvidos. Esta situação leva ao fato de que cada vez menos pessoas estão se aproximando

do atletismo paralímpico, evitando que o esporte se desenvolva e se espalhe amplamente.

Outra patente que relata este problema é a BR102020002791A2, que trata do desenvolvimento de uma cadeira de rodas anatômica, otimizada e parametrizada para tênis, tênis de mesa e esgrima, mostrada na Figura 16 (a).

O exemplo dessa cadeira é interessante pois os projetistas do Centro Brasileiro de Referência em Inovações Tecnológicas para Esportes Paralímpicos (Cintesp.BR) da Universidade Federal de Uberlândia utilizam um tipo de tubo muito específico (Figura 16 b), de difícil fabricação em materiais metálicos e que podem ser fabricados de forma mais fácil em compósitos reforçados por fibra de carbono (CARDOSO et al., 2021).

Figura 16 – a) Visualização 3D da cadeira proposta; b) Tubulação utilizada no projeto de cadeira de rodas.



Fonte: Cardoso et al. (2021)

3 DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS TUBULARES EM FIBRA DE CARBONO

Neste capítulo serão apresentados os processos de fabricação dos tubos e materiais utilizados, detalhando a modelagem tridimensional dos moldes e os testes de desmolde das peças.

Os moldes utilizados para a fabricação das peças em fibra de carbono neste trabalho foram modelados através do *software* Solid Works e exportados para a impressora em formato STL.

A impressora utilizada foi a GTMax Core A3 de alta resolução através de deposição de material fundido da marca GTMax, do Laboratório de Projetos Mecânicos da Universidade Federal de Uberlândia (Figura 17). Este modelo é capaz de imprimir com diversos materiais, como: ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PETg (Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol), PLA (ácido polilático) dentre outros . Como filamento, foi escolhido o filamento de PETG da marca GTMax 3D e diâmetro de 1,75 mm pois este permite uma boa aderência entre as camadas de impressão além de permitir uma impressão mais rápida.

Figura 17 – Impressora GTMax Core A3 do Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM) da Universidade Federal de Uberlândia



Fonte: Autor (2023)

Para o teste de fabricação dos tubos, foram trabalhadas algumas possibilidades de laminação manual. Essa opção foi escolhida devido à indisponibilidade de bombas de vácuo para execução de outros tipos de laminação. Como matéria prima, foi utilizado o tecido bidirecional ($-45^\circ / +45^\circ$) CBS281, da fabricante Barracuda Composites.

Para a laminação foram utilizados o sistema de resina epoxy AR320HV com o endurecedor AH320, que possui características de cura rápida e de alta viscosidade, ideal para laminação manual. Suas propriedades podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do sistema de resina epoxy AR320HV com o endurecedor AH320.

Resina epoxy AR320HV e endurecedor AH320	
Propriedade	Valor
Módulo de tração	4 GPa
Resistência à tração	7,5 MPa
Resistência à flexão	155 MPa
T_g (Temperatura de transição vítrea)	85 °C
Tempo de endurecimento	40 min

Fonte: E-Composites (2022)

Para a laminação dos tubos em fibras de carbono foram necessários realizar testes a fim de determinar o melhor produto desmoldante a ser utilizado em uma laminação manual. Foram testadas três possibilidades:

- Cera automotiva, assim como Castro, Grison e Gasparin (2020);
- Tecido *peelply* que, além de desmoldante, possui a função de fornecer um acabamento melhor;
- Desenvolver moldes que não necessitem de um processo de desmolde através da integração do molde à peça.

Para realizar esse teste, foram utilizados os corpos de prova no formato cilíndrico tanto de PETG quanto de PLA laminados separadamente com os diversos tipos de desmoldante, como mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Corpos de prova com seus respectivos desmoldantes antes de serem laminados. Da esquerda para a direita: *peelply*, cera automotiva, sem desmoldante

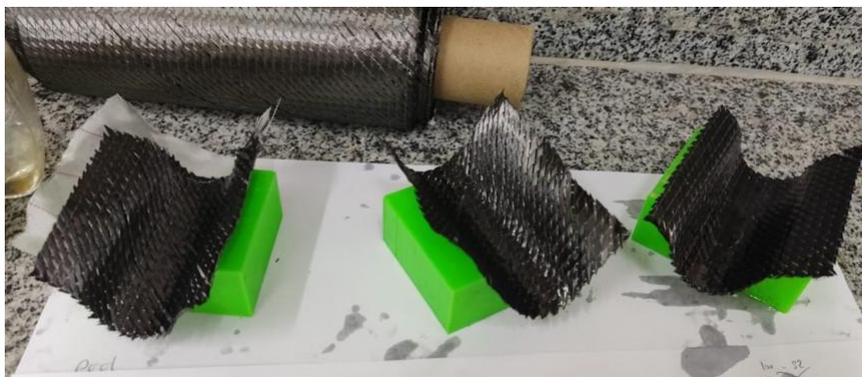


Fonte: Autor (2023)

Após esse teste, observou-se dificuldade no processo de desmolde de peças, mesmo com o uso do desmoldante, devido à geometria cilíndrica do molde. Dessa forma, um

novo teste foi realizado em um corpo de prova negativo de metade de um cilindro, como mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Corpos de prova em negativo de semicírculos já laminados. Da esquerda para a direita: *peelply*, cera automotiva, sem desmoldante



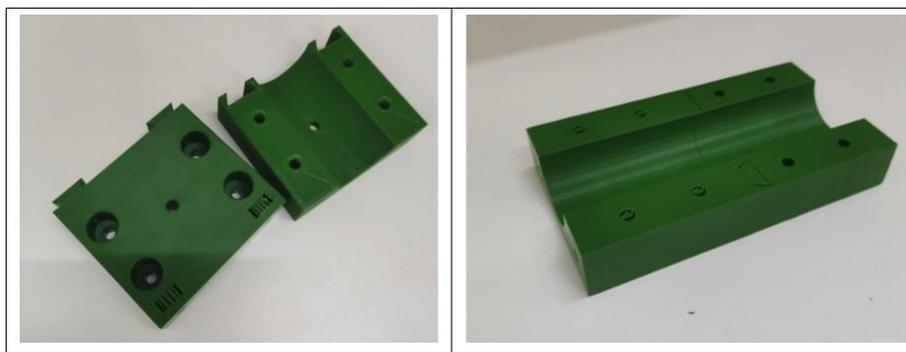
Fonte: Autor (2023)

Dessa forma, foi mais fácil realizar o desmolde, obtendo bons resultados no quesito facilidade de retirada. Devido à interação entre a resina e o PLA, o desmolde se tornou muito difícil, percebendo uma eficácia maior do desmolde com moldes de PETG. O desmoldante que apresentou menor dificuldade para a retirada do modelo foi a cera automotiva, porém seu acabamento não foi satisfatório. Já com o *peelply* percebeu-se um melhor acabamento, porém uma maior dificuldade de realizar o desmolde. Assim, para os próximos passos do projeto optou-se pela cera automotiva como componente desmoldante.

Inicialmente, foram projetados os moldes dos tubos como estruturas que possuíam duas partes separadas para encaixe. Assim, foram desenvolvidos moldes de tubos - "negativos- que se abriam na direção longitudinal para que a laminação fosse realizada.

A fim de cumprir a proposta de modelar tubos com o comprimento desejado os moldes apresentavam encaixes do tipo "rabo de andorinha"(Figura 20), sendo possível acoplar quantas peças forem necessárias para este objetivo.

Figura 20 – Demonstração do rabo de andorinha e molde encaixado



Fonte: Autor (2023)

A homogeneidade na distribuição da resina e centralidade do tubo laminado ocorre por meio de uma peça, montada nas extremidades, que serve como um suporte para um tubo impresso, no qual o laminado irá se acomodar, como mostra a Figura 21. Dessa forma, têm-se uma garantia que, através da injeção de resina no molde e um vão calculado, a distribuição de resina será homogênea e a peça não terá deformações.

Figura 21 – Peças a serem encaixadas no tubo e fixadas no molde para garantir a centralização do compósito na peça final



Fonte: Autor (2023)

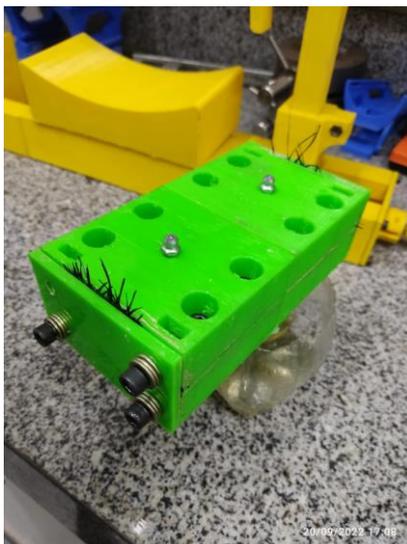
Assim que a manta de fibra de carbono foi adequadamente disposta sobre o molde, o mesmo foi fechado com o uso de parafusos e, através de um furo na parte superior, a resina foi injetada (previamente pesada de acordo com a proporção escolhida) até que ela ocupe todo o volume do vão disponível. O molde fechado com resina e fibra dispostas pode ser visto na Figura 22.

Nesse caso, o tubo interno se manteve como parte estrutural da peça pois é difícil realizar o seu desmolde sem danificar a peça laminada. Porém, com uma redução da espessura da parede e com uma laminação adequada (uma ou mais camadas), sua massa será insignificante com relação à massa total da estrutura e também não terá influência nas propriedades mecânicas da peça final.

Após esperar o tempo de cura da resina recomendado pelo fabricante (24 h) foi feita a abertura do componente e o desmolde da peça final. Devido a interação entre a impressão do molde em PETg com a cera e a resina, foi constatada uma grande dificuldade de realizar esse processo sem danificar tanto a peça quanto o molde, como mostrado na Figura 23 (a). Além disso, foi observado que a resina não adentrou na fibra como esperado, deixando assim uma película vitrificada na parte externa da peça, de acabamento ruim, como mostrado na Figura 23 (b).

A segunda opção foi realizar a laminação manual convencional, sobrepondo a estrutura de manufatura aditiva que servirá como molde. Dessa forma, controlando a

Figura 22 – Molde fechado pronto para esperar o tempo de cura



Fonte: Autor (2023)

Figura 23 – a) Condição dos componentes pós desmolde; b) Condição da peça pós desmolde

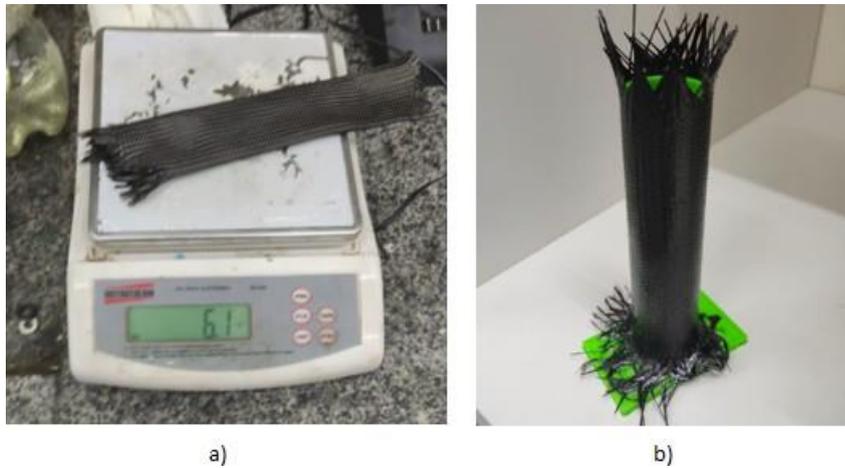


Fonte: Autor (2023)

massa e a proporção entre fibra/resina, conseguiu-se um resultado melhor - tanto em acabamento, quanto uniformidade - da peça final.

No caso do tubo teste, feito de PETg, foi laminada uma peça com comprimento de 250 mm a partir da fixação do molde no apoio e laminando-a manualmente. A massa da manga de fibra de carbono utilizada foi de 6,1 g (Figura 24 a). Como a proporção escolhida foi de 30 % de fibra para 70 % de resina, temos uma massa de 14,23 g de resina. Seguindo a recomendação do fabricante da resina AR320, a proporção entre esta e o catalizador é de 2:1, portanto 9,48 g de resina para 4,74 g de catalisador. A laminação foi feita manualmente e o tempo de cura de 24 h foi respeitado (Figura 24 b). Após esse tempo, a peça teve suas pontas aparadas e foi lixada.

Figura 24 – a) Massa de fibra de carbono utilizada; b) Resultado da laminação com o molde fixado internamente.



Fonte: Autor (2023)

Portanto, após os testes executados para a fabricação dos tubos observou-se que, dentro das limitações existentes para a laminação, a forma mais adequada de fabricação é a laminação manual do tubo de PETg nas dimensões requeridas utilizando o Tecido bidirecional de fibra de carbono (45°/ + 45°) CBS281 e resina epoxy AR320HV. Neste processo o molde em manufatura aditiva permanece na estrutura final e não é necessário realizar o desmolde.

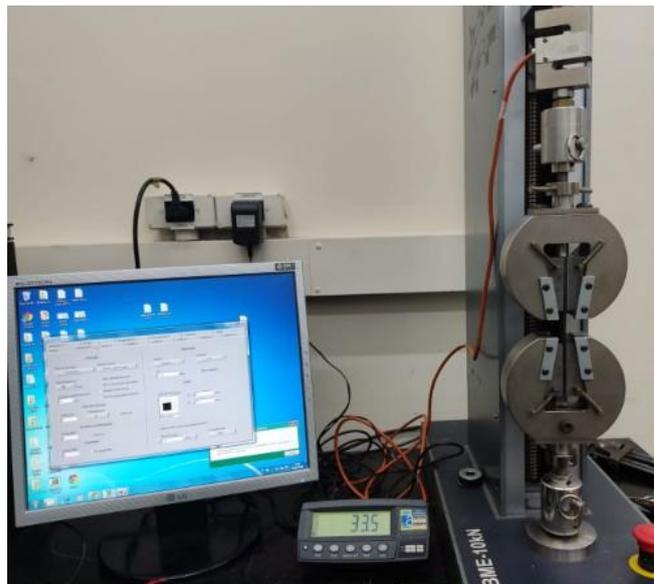
4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA FIBRA DE CARBONO

Os ensaios mecânicos são indispensáveis para obter as propriedades do material, pois caracterizam o comportamento do material e podem ser aplicadas em futuras simulações computacionais de cadeiras de rodas e outros equipamentos que utilizem as estruturas tubulares de fibra de carbono em seus projetos.

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado no Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM) da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica. O teste foi realizado na Máquina Universal de Ensaio, marca Oswaldo Filizola, modelo BME dotada de uma célula de carga com capacidade de 10 kN, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Setup utilizado para os ensaios de tração no Laboratório de Projetos Mecânicos da Universidade Federal de Uberlândia.



Fonte: Autor (2023)

As configurações do teste seguiram a norma vigente ASTM-D3039 (2002) que determina as condições para os testes de tração em materiais compósitos. Segundo a norma, a espessura e largura dos corpos de prova podem ser especificadas pelo projetista, desde que sigam as relações de proporções recomendadas. Dessa forma, para que a amostra possa ser testada pela máquina disponível, as dimensões utilizadas para o corpo de prova impresso em PETG podem ser vistas na Figura 26. Entretanto, como a laminação foi feita manualmente, houve um acréscimo de aproximadamente 1,5 mm na largura final e 1 mm na espessura final.

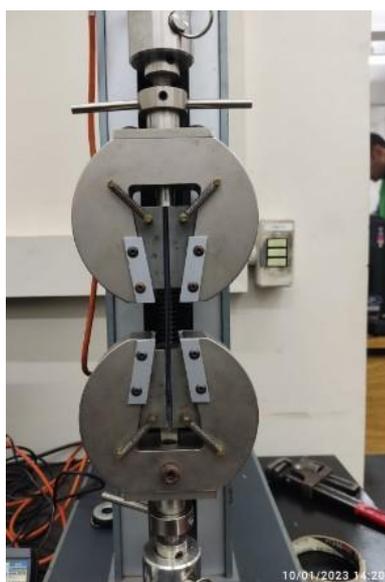
Figura 26 – Desenho técnico da impressão 3D do corpo de prova utilizado nos testes de tração. Dimensões em mm.



Fonte: Autor (2023)

As amostras foram fixadas com a utilização das garras de fixação e o comprimento útil entre elas foi de 40 mm, como apresentado na Figura 27. Foram testadas 5 amostras e obtidas as curvas de tensão x deformação que serão apresentadas a seguir.

Figura 27 – *Setup* utilizado para o ensaio de tração.



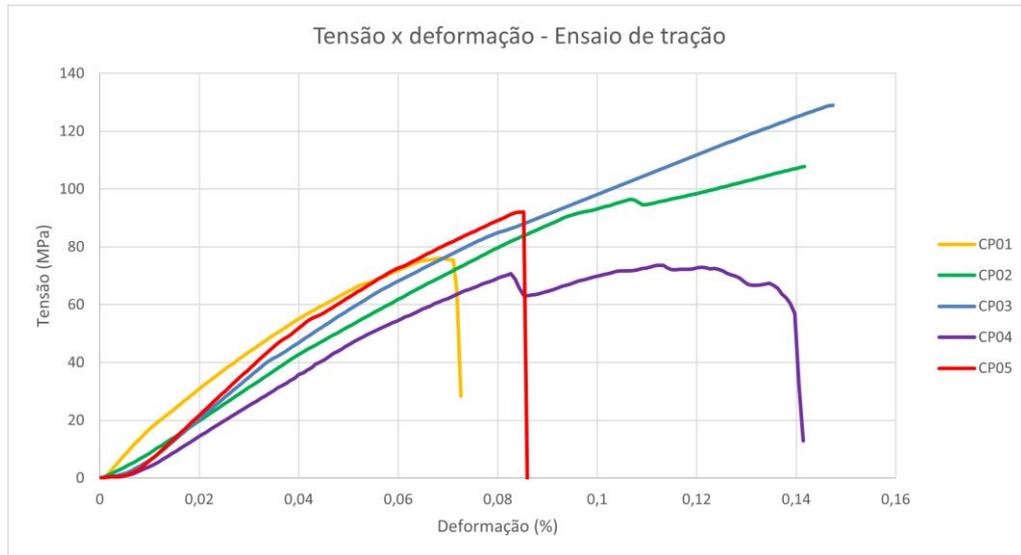
Fonte: Autor (2023)

Como velocidade de ensaio, foi escolhida a de 10 mm/min e a aquisição de dados foi feita por meio do software DinaView Pro M.

As curvas experimentais tensão x deformação obtidas pelos ensaios de tração, para cada um dos corpos de prova, podem ser vistas na Figura 28. É possível observar um comportamento mecânico semelhante para as curvas nos ensaios das cinco amostras. As diferenças existentes entre elas ocorreram devido as variações inerentes ao processo de fabricação manual do corpo de prova. Nesse processo, durante a laminação manual, pode ser aplicada resina ou a fibra de forma irregular. Além disso, a fixação nas garras pode também influenciar nos resultados.

Os dados obtidos, assim como os valores médios, podem ser visualizados na Tabela 6. Nota-se que o maior valor de tensão de ruptura foi de 129,02 MPa e de deslocamento foi de 6,07 mm para o corpo de prova 3. O valor médio de tensão de ruptura foi de 95,04 MPa, deformação de 12 % e módulo de elasticidade calculado de 1006,08 MPa.

Figura 28 – Curvas obtidas através dos ensaios experimentais de tração



Fonte: Autor (2023)

Os dados obtidos, assim como os valores médios podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados obtidos no ensaio de tração das amostras de polímero reforçado com fibra de carbono.

CP	Tensão máxima [MPa]	Carga máxima [N]	l (mm)	Deslocamento máximo [mm]	Deformação percentual (%)	Módulo de Young, E (MPa)
1	76,14	3422,50	40,00	3,07	8%	1355,47
2	107,77	5275,00	40,00	5,67	14%	936,32
3	129,02	6040,01	40,00	6,07	15%	980,68
4	73,69	3115,50	40,00	4,40	11%	704,32
5	92,10	4350,46	40,00	3,83	10%	1053,61
MÉDIA	95,74	4440,70	40,00	4,61	12%	1006,08
DESVIO PADRÃO	20,67	1100,44	0,00	1,12	3%	210,19

Fonte: Autor (2023)

4.2 ENSAIOS DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão foram realizados na máquina universal de ensaios do Laboratório de Projetos Mecânicos, marca Oswaldo Filizola, modelo BME com capacidade máxima de 10 kN.

Para esse ensaio as recomendações da norma ASTM-D790 (2017) foram seguidas, como distância entre os dois apoios, além de dimensões do ponto de aplicação de força e apoios. A configuração utilizada pode ser vista na Figura 29.

Figura 29 – Setup utilizada na Máquina de Ensaio Universal para realizar o ensaio de flexão segundo recomendações da ASTM-D790



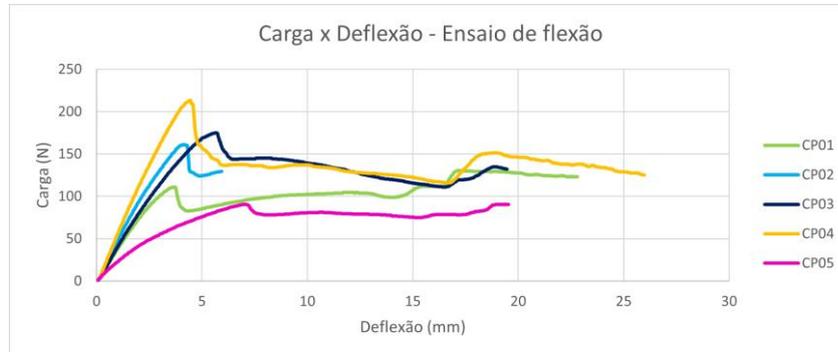
Fonte: Autor (2023)

As dimensões do corpo de prova são as mesmas daquele utilizado no ensaio de tração, apresentados na Figura 26. Segundo a norma, o vão livre para a realização do teste é medido em função da espessura do corpo de prova utilizado, nesse caso, 16:1. Como a espessura média é de 3,5 mm, têm-se um vão livre de 56 mm.

A velocidade de ensaio foi a mesma utilizada no ensaio de tração, 10 mm/min e a aquisição de dados também foi feita por meio do *software* Dina View Pro M.

As curvas de Carga (N) x Deflexão (mm) obtidas pelos ensaios de flexão, para cada um dos corpos de prova, podem ser vistos na Figura 30.

Figura 30 – Curvas obtidas através dos ensaios experimentais de flexão



Fonte: Autor (2023)

Pode-se notar uma semelhança no comportamento mecânico das curvas presentes nos testes das cinco amostras, porém as discrepâncias entre elas decorrem das variações naturais do processo de produção manual das peças. Durante a laminação manual, é possível que ocorra aplicação desigual de resina ou fibra.

Os dados obtidos, assim como os valores médios, podem ser visualizados na Tabela 7. Percebe-se que o maior valor de Carga foi de 213 MPa e uma deflexão máxima de 4,67 mm para o corpo de prova 4. O valor médio de tensão da carga de aplicação foi de 71,05 MPa.

Tabela 7 – Tabela com as propriedades utilizadas e obtidas a partir do ensaio de flexão

CP	Força máxima [N]	Comprimento útil (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área da seção (mm ²)	Tensão (MPa)
1	130,50	121,57	15,69	3,66	5743%	52,87
2	161,00	130,32	15,55	3,47	5396%	73,22
3	175,00	128,25	15,42	3,60	5551%	74,57
4	213,00	128,86	15,28	3,25	4966%	112,38
5	90,50	129,57	15,42	3,29	5073%	46,17
MÉDIA	154,00	127,71	15,47	3,45	5346%	71,05
DESVIO PADRÃO	46,25	3,52	0,15	0,18	324%	25,84

Fonte: Autor (2023)

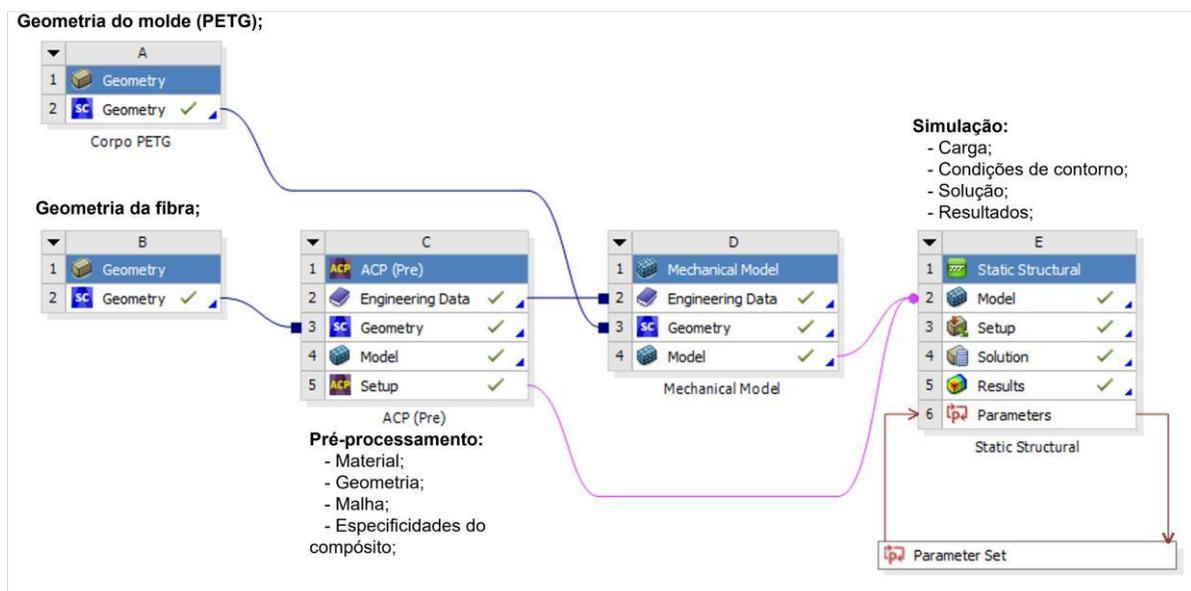
5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CORPO DE PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO DE TRAÇÃO

A modelagem computacional dos corpos de prova utilizados foi realizada por meio da ferramenta disponível no *software* Ansys Workbench, denominado ACP - *Ansys Composite PrepPost*. Esta é uma ferramenta dedicada, exclusivamente, à modelagem de compósitos laminados. Dessa forma, um dos objetivos deste trabalho foi também entender como funciona esse módulo específico de análise dentro do *software* Ansys.

Este módulo permite gerar modelos de elementos finitos com diferentes regiões de laminação definidas camada por camada. A partir da escolha dos dados do material, o ACP permite definir parâmetros como a sequência de empilhamento, número de camadas, espessura do laminado e orientação das fibras.

A modelagem dos corpos de prova pode ser dividida em algumas etapas, como: desenho e integração das geometrias utilizadas, determinação das propriedades do compósito e aplicação das condições de contorno do modelo. O processo realizado no *software* Ansys Workbench foi ilustrado na Figura 31.

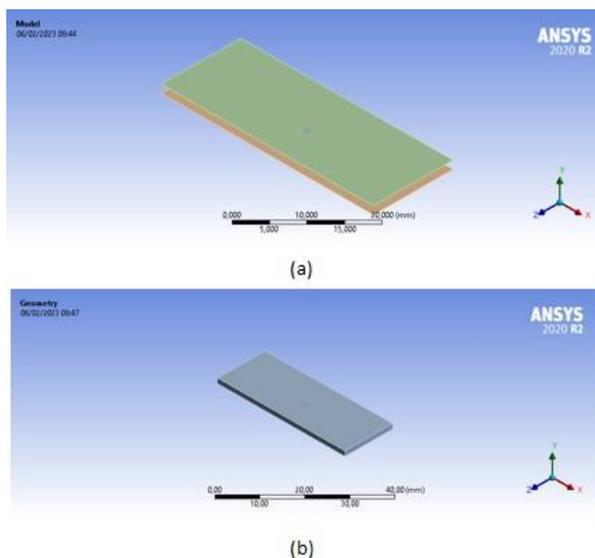
Figura 31 – Esquemática das etapas da simulação no Ansys Workbench



Fonte: Autor (2023)

Nas Janelas A e B referentes à etapa de modelagem, foram definidas, separadamente, as geometrias de estruturas da fibra (Figura 32 a) e do molde (Figura 32 b), para depois serem unidas em outra etapa. Para a simulação, foi considerado o comprimento útil do corpo de prova ensaiado, de 40 mm.

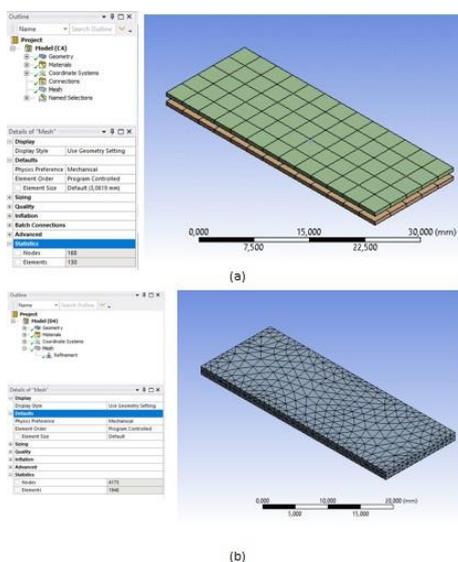
Figura 32 – a) Geometria da fibra modelada; b) Geometria do molde.



Fonte: Autor (2023)

Tanto a malha da fibra, gerada na Janela C (Pré-processamento), quanto a malha do molde, gerada na Janela D, foram aquelas sugeridas pelo próprio *software*, para que fosse mantida uma simulação com baixo custo computacional e atendesse aos objetivos. Dessa forma, tem-se que a fase fibra possui uma malha com 168 nós e 130 elementos tetraédricos e um *skewness* máximo de 0,813 (Figura 33 a). Para o molde, temos 1202 nós e 152 elementos e um *skewness* de 0,91 (Figura 33 b). Assim, têm-se que a malha está aceitável pois, segundo Ansys (s.d.) o valor de *skewness* de uma malha é aceitável quando é menor que 0,95.

Figura 33 – a) Malha da fase de fibra b) Malha do molde.



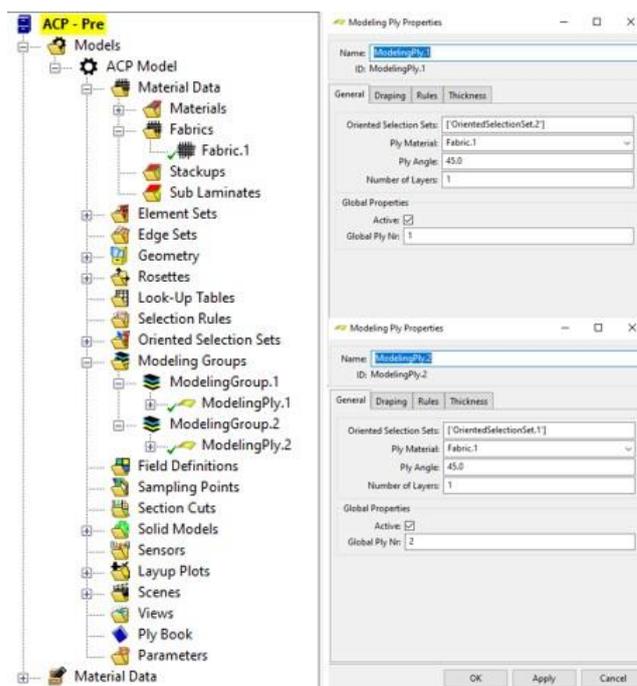
Fonte: Autor (2023)

Para as propriedades mecânicas da fibra de carbono considerou-se o módulo de elasticidade de 945,38 MPa, obtido dos ensaios de tração e o coeficiente de Poisson de 0,3 (SOUZA, H. B. d., 2017). O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson para o PETg foram de 28 MPa e 0,38, respectivamente (GTMAX, s.d.).

A modelagem da fibra no *software* é feita através do módulo de ACP pré (Aba Setup da Janela C do ambiente de trabalho da Figura 31). Nele foi possível definir o laminado a ser utilizado, assim como a espessura de cada camada. Dessa forma, foi definida uma espessura de 0,72 mm por laminação para que, ao renderizar o modelo, o corpo de prova tenha a mesma espessura que o experimental.

Portanto, foram realizadas 2 laminações diferentes, uma para a parte superior e outra para a inferior, as duas com orientação das fibras de 45°, como pode ser visto na Figura 34.

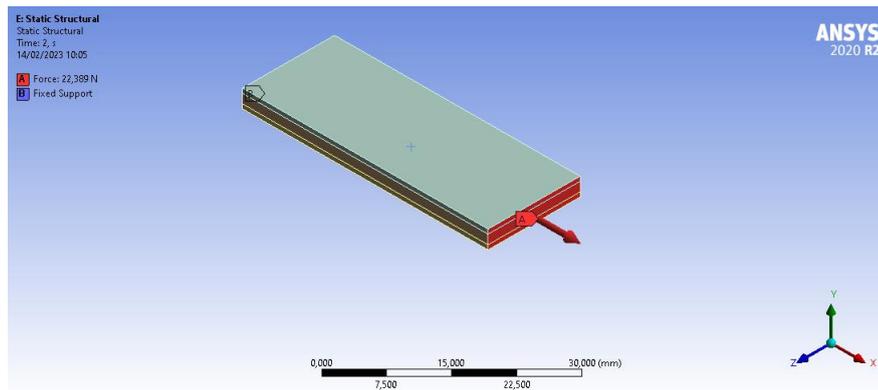
Figura 34 – Configurações utilizadas na modelagem do material compósito na ferramenta Ansys ACP



Fonte: Autor (2023)

Para o ensaio de tração foram definidas duas condições de contorno: um engaste em uma das extremidades e uma força sendo aplicada gradualmente na outra extremidade, como mostrado na Figura 35. Essa força variou com a mesma intensidade daquela realizada nos ensaios de tração experimentais, usando a ferramenta de pré-estabelecimento de parâmetros do Ansys, como mostrado na Figura 36. Foram aplicados 101 valores de força de tração obtidas do ensaio e observados os valores de deslocamento resultante, para traçar a curva tensão x deformação dos modelos simulados.

Figura 35 – Pontos de aplicação da força e engaste do modelo.



Fonte: Autor (2023)

Dessa forma, foram escolhidos os 101 primeiros pontos de aplicação de força (os mesmos do ensaio experimental) e o *software* calculou os valores de tensão máxima e deslocamento máximo.

Figura 36 – Condições de contorno utilizadas na simulação

Outline of Schematic E6: Parameters					
ID	Parameter Name	Value	Unit	Name	Value
Input Parameters					
Static Structural (E1)					
P1	Force X Component	22,389	N	P1 - Force X Component	
Output Parameters					
Static Structural (E1)					
P2	Maximum Principal Stress Maximum	1,3121	MPa	DP 0 (Current)	22,389
P3	Total Deformation Maximum	0,022702	mm	DP 1	40,553
P4	Equivalent Stress Maximum	0,9988	MPa	DP 2	77,804
P5	Maximum Shear Stress Maximum	0,52093	MPa	DP 3	93,755
P6	Equivalent Stress Minimum	0,19315	MPa	DP 4	152,35
P7	Equivalent Stress Average	0,52558	MPa	DP 5	165,2
P8	Total Deformation Minimum	0	mm	DP 6	251,44
Charts					
Parameter Chart 0					
				DP 7	271,52
				DP 8	365,77
				DP 9	392,1
				DP 10	489,03

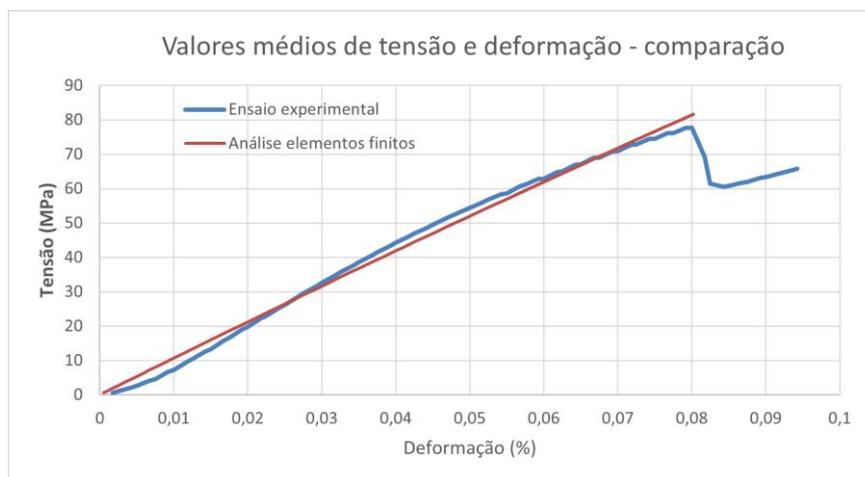
Fonte: Autor (2023)

Para plotar a curva média dos ensaios de tração, foi realizada uma média entre os valores de tensão e deslocamento obtidos experimentalmente. Como a velocidade de ensaio e a taxa de aquisição do *software* foram as mesmas para os cinco ensaios, foi possível analisar valores de deslocamentos semelhantes para cada corpo de prova, possibilitando a realização da média de tensões. Dessa forma, encontrou-se uma tensão máxima de 77,68 MPa, para uma força de 3063,65 N e um deslocamento igual a 3,17 mm.

A partir dos pontos médios entre os cinco ensaios de tração realizados e os dados calculados pelo *software* Ansys a partir dos 101 pontos de força aplicados, foi possível plotar uma curva comparativa de tensão x deformação entre essas duas bases de dados, como mostrada na Figura 37.

Para efeito de comparação, foi realizado um cálculo com o erro equivalente a cada ponto de força aplicado entre as curvas: experimental e computacional. Dessa maneira, foi

Figura 37 – Comparação entre curvas obtidas através dos ensaios de tração e análise de elementos finitos.



Fonte: Autor (2023)

obtido um erro médio de 9 % entre as duas condições, além de um erro máximo de 22 %, no ponto de rompimento das fibras no ensaio experimental.

A partir dos gráficos mostrados na Figura 37, foram calculados os valores de módulo de elasticidade do compósito fabricado em polímero e fibra de carbono. Para a curva experimental se obteve um valor de 939,35 MPa, enquanto que para a curva dos resultados simulados o valor foi de 1039,62 MPa.

Considerando as possíveis variações encontradas no ensaio e as simplificações adotadas no modelo numérico, pode-se concluir que o modelo de elementos finitos desenvolvido para representar o ensaio de tração do compósito testado é válido. Assim, as propriedades encontradas podem ser aplicadas em simulações estruturais de cadeiras de rodas esportivas ou outros dispositivos que utilizarão os tubos em fibra de carbono propostos neste trabalho.

6 CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento deste trabalho, percebeu-se que a fabricação de materiais Polímeros Reforçados por Fibra de Carbono (PRFC) é complexa e demanda experiência e conhecimento da equipe responsável. Métodos como a laminação por bolsa de vácuo podem ser mais rentáveis, objetivos e padronizados que a laminação manual, no qual ocorrem grandes perdas de material, muita influência do meio externo e uma falta de padronização das peças.

A fabricação de moldes por meio de manufatura aditiva é uma realidade no mercado e deve ser desenvolvida de forma a complementar o mercado de PRFC's. A melhor maneira de integrar as duas técnicas para a fabricação de peças tubulares foi o envolvimento do molde impresso com a fibra e a resina, de forma que se tornassem uma peça só, já que os métodos de desmolde testados para a laminação manual não foram satisfatórios. Para trabalhos futuros, seria interessante realizar testes de desmolde para a laminação com o auxílio da bolsa de vácuo.

As propriedades mecânicas das peças evidenciaram que os CFRP dependem de vários fatores relativos à composição da peça e ao processo de fabricação, como relação em massa entre fibra e resina, condições de cura, orientação das fibras e método de laminação.

A utilização do *software* Ansys e seu módulo ACP, específico para modelagem e simulação de compósitos foi satisfatória, evidenciando uma grande convergência para com os ensaios realizados experimentalmente. Assim, as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente e o modelo numérico validado podem ser aplicados em futuros projetos de cadeiras de rodas esportivas, cadeiras de rodas de uso diário ou outros dispositivos que utilizarão os tubos em fibra de carbono propostos neste trabalho.

Em trabalhos futuros devem ser testadas diferentes configurações para as peças, como: variar a rugosidade e material do molde impresso, de forma a melhorar a aderência do compósito na peça; testar relações entre massa de fibra e massa de resina diferentes a fim de avaliar variações no comportamento mecânico; ensaiar peças com mais camadas de laminação. Além disso, é necessário entender e praticar mais sobre o módulo ACP do Ansys, de forma a realizar ensaios de mecanismos reais, para projetos de otimização.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. **6.2.2 Mesh Quality**. Disponível em: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm>. (accessado em 14.02.2023).
- ASTM-D3039. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. v. 14.02. [S.l.]: Annual Book of ASTM Standards, 2002.
- ASTM-D790. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. v. 08.01. [S.l.]: Annual Book of ASTM Standards, 2017.
- ATHAWALE, Anjali A; ALHOUSAMI, Mohammed HM. Epoxy resin-modified, urea-formaldehyde/silicon networks for high impact strength and thermal stability. **Journal of reinforced plastics and composites**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 28, n. 18, p. 2231–2239, 2009. <https://doi.org/10.1177/0731684408092366>
- ATTAF, B. Ecodesign criteria for composite materials and products. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, v. 5, n. 1, p. 69–80, 2013. <https://doi.org/10.4314/jfas.v5i1.6>
- AUTHIER, Erica L; PEARLMAN, Jon; ALLEGRETTI, Ana L; RICE, Ian; COOPER, Rory A. A sports wheelchair for low-income countries. **Disability and Rehabilitation**, Taylor & Francis, v. 29, n. 11-12, p. 963–967, 2007. <https://doi.org/10.1080/09638280701240714>
- BAKER, Alan A. **Composite materials for aircraft structures**. [S.l.]: AIAA, 2004.
- BARTON, John M. The application of differential scanning calorimetry (DSC) to the study of epoxy resin curing reactions. *In: EPOXY resins and composites I*. [S.l.]: Springer, 1985. P. 111–154. https://doi.org/10.1007/3-540-15546-5_5
- BELINGARDI, Giovanni; CAVATORTA, Maria Pia; PAOLINO, Davide Salvatore. Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminates. **International Journal of Impact Engineering**, Elsevier, v. 35, n. 7, p. 609–619, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.02.005>
- BERNARDINO, Erika. **Consumo de compósitos cresceu 17,8% em 2021**. [S.l.: s.n.], abr. 2022. Disponível em: <https://almaco.org.br/>.

- BIKAS, Harry; STAVROPOULOS, Panagiotis; CHRYSSOLOURIS, George. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 83, n. 1, p. 389–405, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- BRAZUNA, Melissa Rodrigues; CASTRO, Eliane. A trajetória do atleta portador de deficiência física no esporte adaptado de rendimento: uma revisão da literatura. **Motriz**, v. 7, n. 2, p. 115–123, 2001.
- CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.
- CAMPBELL, Flake C. **Structural composite materials**. [S.l.]: ASM international, 2010. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.scm.9781627083140>
- CANEVAROLO JR, Sebastião V. Ciência dos polímeros. **Artiliber editora, São Paulo**, v. 24, 2002.
- CARDOSO, Lucas De Souza; ARAÚJO, Cleudmar Amaral De; YOSHIDA, Daniela Moura; ALVES, Diego Augusto Costa; BORGES, Jonas Profeta; FAZZIO, Fernando Roberto De. **Cadeira de rodas anatômica otimizada e parametrizada para tênis, tênis de mesa e esgrima**. [S.l.]: Google Patents, 2021. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/BR102020002791A2>.
- CASTRO, Alexandre Mendes de; GRISON, Vagner; GASPARIN, Alexandre Luis. Desenvolvimento de um processo de laminação de material compósito com fibra de carbono e matriz de resina epóxi da asa de uma aeronave. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 6, p. 3772–3791, 2020. <https://doi.org/10.34115/basrv4n6-038>
- CHANDRASHEKHARA, K; SUNDARARAMAN, Saikrishna; FLANIGAN, V; KAPILA, S. Affordable composites using renewable materials. **Materials Science and Engineering: A**, Elsevier, v. 412, n. 1-2, p. 2–6, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.066>
- CHUNG. **Carbon fiber composites**. [S.l.]: Elsevier, 2012.
- CHUNG, DDL. Processing-structure-property relationships of continuous carbon fiber polymer-matrix composites. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, Elsevier, v. 113, p. 1–29, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2017.01.002>

CIDADE, Ruth Eugênia Amarante; FREITAS, Patricia Silvestre de. **Introdução à educação física e ao esporte para pessoas portadoras de deficiência**. [S.l.]: UFPR, 2002.

COMPOSITES, Barracuda. **Infusão a Vácuo**. 2020. Disponível em: <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/infusao-a-vacu/>. (accessado em 27.01.2023).

COMPOSITES, Barracuda. **Laminação por Vacuum Bag**. 2020. Disponível em: <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/laminacao-por-vacuum-bag/>. (accessado em 27.01.2023).

COWAN, Rachel E.; FREGLY, Benjamin J.; BONINGER, Michael L.; CHAN, Leighton; RODGERS, Mary M.; REINKENSMEYER, David J. Recent trends in assistive technology for mobility. **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, BioMed Central, v. 9, n. 1, p. 1–8, 2012. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-20>

CPB. **A história do Comitê Paralímpico Brasileiro**. 2021. Disponível em: [https://www.cpb.org.br/conteudo/detalhe/3/historia#:~:text=O%5C%20Comit%5C%C3%5C%AA%5C%20Paral%5C%C3%5C%ADmpico%5C%20Brasileiro%5C%20\(CPB, frente%5C%20da%5C%20entidade%5C%20at%5C%C3%5C%A9%5C%202001..](https://www.cpb.org.br/conteudo/detalhe/3/historia#:~:text=O%5C%20Comit%5C%C3%5C%AA%5C%20Paral%5C%C3%5C%ADmpico%5C%20Brasileiro%5C%20(CPB, frente%5C%20da%5C%20entidade%5C%20at%5C%C3%5C%A9%5C%202001..) (accessado em 23/08/2022).

CTPB. **O centro de treinamento paralímpico brasileiro**. 2021. Disponível em: <https://www.cpb.org.br/centrotreinamento>. (accessado em 23.08.2022).

CUSTOM, Smart. **A empresa**. 2021. Disponível em: <http://smarter.com.br/a-empresa/>. (accessado em 15.02.2023).

DE OLIVEIRA, Luiza Maria Borges. **Cartilha do censo de 2010 - Pessoas com deficiência**. [S.l.]: Secretaria Nacional de Promoção dos Direitos da Pessoa com Deficiência, 2012. P. 6–32.

DE PAOLI, Marco Aurelio. **Degradação e estabilização de polímeros**. [S.l.]: Artliber São Paulo, 2009.

E-COMPOSITES. **Datasheet Sistema de resina AR320HV e AH320**. 2022. Disponível em: https://www.marinecomposites.com.br/wp-content/uploads/datasheets/resina_epoxy_ar320hv.pdf. (accessado em 22.10.2022).

EIKEVÅG, Sindre Wold et al. Sports Equipment Design Impact on Athlet Performance-The PR1 Paralympic Women's Indoor Rowing World Record. **ISEA 2022 – The Engineering of Sport 14**, 2022. <https://doi.org/10.5703/1288284317474>

END, Top. **About Us**. 2022. Disponível em: <https://topendwheelchair.invacare.com/home>. (accessado em 27.01.2023).

END, Top. **T-5 7000 Series Tennis Wheelchair**. 2021. Disponível em: <https://topendwheelchair.invacare.com/t-5-7000-series-tennis-wheelchair/product/t5700>. (accessado em 27.01.2023).

FARIA, Marina Dias de; CARVALHO, José Luis Felicio. Uma análise semiótica do potencial mercadológico da imagem de atletas paraolímpicos. **Gestão e Sociedade**, v. 4, n. 9, p. 657–688, 2010. <https://doi.org/10.21171/ges.v4i9.994>

GALLAGHER, RH; ODEN, JT; TAYLOR, C; ZIENKIEWICZ, C. Finite Element At&@. **Analysis–Fundamentals**, Prentice Hall, 1975.

GARCIA, Luis Hilário Tobler. **Desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de Manufatura Aditiva**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.18.2019.tde-04092019-125437>

GTMAX. **Datasheet FILAMENTO PETG 1.75MM GTMAX3D - NATURAL (TRANSPARENTE) 1KG**. Disponível em: <https://www.gtmax3d.com.br/filamentos/petg/175mm-gtmax3d-natural>. (accessado em 13.08.2022).

HAYES, BS et al. Scaling complications of dual temperature cure resin prepreg systems in airplane part manufacture. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 31, n. 7, p. 717–725, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00012-9)

HEINZL, Johann; HERTZ, Carl Hellmuth. Ink-jet printing. *In: ADVANCES in electronics and electron physics*. [S.l.]: Elsevier, 1985. v. 65. P. 91–171. [https://doi.org/10.1016/S0065-2539\(08\)60877-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2539(08)60877-X)

INVACARE. **About Us**. 2022. Disponível em: <https://global.invacare.com/about-us>. (accessado em 27.01.2023).

MASUELLI, Martin. **Fiber reinforced polymers: the technology applied for concrete repair**. [S.l.]: BoD–Books on Demand, 2013. <https://doi.org/10.5772/3162>

MENDONÇA, Paulo de Tarso Rocha de. **Materiais compostos e estruturas-sanduche: projeto e análise**. [S.l.]: Manole, 2005.

MOBILITY. **Cadeiras de rodas de alta performance**. 2023. Disponível em: <https://www.mobilitybrasil.com.br/cadeira-de-roda-de-alta-performance>. (accessado em 15.02.2023).

ORTOBRAS. **A empresa**. 2020. Disponível em: <https://ortobras.com.br/a-empresa/>. (accessado em 15.02.2023).

ORTOMOBIL. **Conheça a empresa**. 2023. Disponível em: <http://ortomobil.com.br/ortomobil.html>. (accessado em 15.02.2023).

PACIOREK, Michael J; JONES, Jeffery A. **Disability sport and recreation resources**. [S.l.]: Cooper, 2001.

PEREIRA, Christof dos Santos. **Fadiga em elementos tubulares de matriz epoxídica reforçada com fibras de carbono sujeitos a solicitações de torção e flexão**. 2013. Tese (Doutorado).

PETERS, Stanley T. **Handbook of composites**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.

SABAT, Lovely; KUNDU, Chinmay Kumar. History of finite element method: a review. **Recent Developments in Sustainable Infrastructure**, Springer, p. 395–404, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1_32

SAVU, Ionel Danut; SAVU, Sorin Vasile; SIMION, Dalia; SIRBU, NICUS, OR-ALIN; CIORNEI, Mirela; RATIU, Sorin Aurel. PP in 3D Printing–Technical and Economic Aspects. **Mater. Plast**, v. 56, p. 931, 2019. <https://doi.org/10.37358/MP.19.4.5286>

SCHEID, Luciana; ROCHA, Edilson Alves da. Organização Administrativa do Desporto Paralímpico. **WINCKLER, Ciro; MELLO, Marco Túlio de. Esporte Paralímpico. São Paulo, SP. Editora Atheneu**, 2012.

SHAHRUBUDIN, Nurhalida et al. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 35, p. 1286–1296, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>

SONG, Yuhua; ZHANG, Yongjie; SHEN, Tongye; BAJAJ, Chandrajit L; MCCAMMON, J Andrew; BAKER, Nathan A. Finite element solution of the steady-state Smoluchowski equation for rate constant calculations. **Biophysical Journal**, Elsevier, v. 86, n. 4, p. 2017–2029, 2004.

[https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(04\)74263-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(04)74263-0)

SOUZA, Higor Barbosa de. Caracterização computacional e mecânica de compósitos laminados de fibra de carbono em matriz epóxi, 2017.

SOUZA, Júlio de; YAMANE, Fabíola Ottoboni; SOUZA, Ângelo de; ANCELOTTI JR, Antônio Carlos; LIMA JR, José Juliano de. Use of technique of acoustic loading random to simulate failure/damage in structures beam type. *In: 11TH International Conference on Vibration Problems*. [S.l.: s.n.], 2013.

STRONG, A Brent. **Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications**. [S.l.]: Society of manufacturing engineers, 2008.

TAMEZ, Manuel B Arrillaga; TAHA, Iman. A review of additive manufacturing technologies and markets for thermosetting resins and their potential for carbon fiber integration. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 37, p. 101748, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101748>

UUSITALO, Katarina. **Designing in carbon fibre composites**. 2013. Diss. (Mestrado).

VANLANDEWIJCK, Yves; THEISEN, Daniel; DALY, Dan. Wheelchair propulsion biomechanics: implications for wheelchair sports. **Sports medicine**, Springer, v. 31, p. 339–367, 2001. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131050-00005>

WHEELCHAIRS, Quickie. **Quickie Match Point Ti Sport Wheelchair**. 2022.

Disponível em:

<https://www.quickie-wheelchairs.com/All-Quickie-Wheelchairs/All-Court-Tennis-Basketball-Wheelchairs/Quickie-Match-Point-Ti-Sport-Wheelchair/3108p>. (accessado em 27.01.2023).

WHEELCHAIRS, Quickie. **About Us**. 2022. Disponível em:

<https://www.quickie-wheelchairs.com/company/about-us>. (accessado em 27.01.2023).

WILLIAMS, Christopher; SUMMERSCALES, John; GROVE, Stephen. Resin infusion under flexible tooling (RIFT): a review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 27, n. 7, p. 517–524, 1996. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00008-5](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00008-5)

XIMING, Jia. **A kind of carbon fiber wheelchair**. [S.l.]: Google Patents, 2018. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/CN208864663U>.

ZENG, Minfeng; LU, Cuiyun; WANG, Baoyi; QI, Chenze. Free volume hole size of cyanate ester resin/epoxy resin interpenetrating networks and its correlations with physical properties. **Radiation Physics and Chemistry**, Elsevier, v. 79, n. 9, p. 966–975, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.03.006>

ZHENDONG, Fang; QINGHAI, Xangai. **Carbon fiber wheel chair rim**. [S.l.]: Google Patents, 2022. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/CN217319913U>.