

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA - IFBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DOS MATERIAIS - PPGEM

AECIO CLEBER SANTOS SILVA

**SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DE UM COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO
COM FIBRA DE LICURI (*SYAGRUS CORONATA*) EM ESTRUTURAS DE CADEIRAS
DE RODAS**

SALVADOR

2022

AECIO CLEBER SANTOS SILVA

**SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DE UM COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO
COM FIBRA DE LICURI (*SYAGRUS CORONATA*) EM ESTRUTURAS DE CADEIRAS
DE RODAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do IFBA, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Caracterização de Materiais

Orientadora: Prof. Dra. Tharsia Cristiany de Carvalho
Costa

SALVADOR

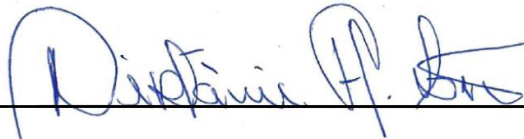
2022

AECIO CLEBER SANTOS SILVA

**SIMULAÇÃO DA APLICAÇÃO DE UM COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO
COM FIBRA DE LICURI (*SYAGRUS CORONATA*) EM ESTRUTURAS DE CADEIRAS
DE RODAS**

Trabalho final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Mirtânia Antunes Leão - IFBA



Prof. Dr. Silvando Vieira dos Santos - IFBA



Prof. Dr. Thercio Henrique de Carvalho Costa - UFRN



Orientadora: Prof. Dra. Tharsia Cristiany de Carvalho Costa - IFBA

Apresentado e aprovado em: 19, de dezembro de 2022.

Biblioteca Raul V. Seixas – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA - Salvador/BA.

S586s Silva, Aecio Cleber Santos.

Simulação da aplicação de um compósito polimérico reforçado com fibra de licuri (*syagrus coronata*) em estruturas de cadeiras de rodas / Aecio Cleber Santos Silva. Salvador, 2022.

90 f. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tharsia Cristiany de Carvalho Costa.

1. Compósito polimérico. 2. Fibra de licuri. 3. Simulação computacional. 4. Elementos finitos. 5. Cadeira de rodas. I. Costa, Tharsia Cristiany de Carvalho. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia. III. Título.

620.197 CDU 2 ed.

DEDICATÓRIA

À minha família, minha esposa Naiara Pimentel e meus filhos Gustavo e Caian, pela compreensão, incentivo, apoio, e por despertarem em mim uma evolução constante. E a Deus, por abençoar e iluminar meus passos, permitindo a realização de mais um sonho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por abrir as portas e permitir que tudo isso se tornasse realidade.

À minha família, minha esposa Naiara Pimentel e meus filhos Gustavo e Caian, pela paciência, compreensão, amor, carinho e incentivo prestados em todos os momentos.

Aos meus pais e avós, pelos valores transmitidos ao longo da vida, principalmente à minha mãe, que sempre fez de tudo para termos boa base escolar.

A todos os professores e colaboradores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia que fazem parte do PPGEM. Em especial à professora Dra. Tharsia de Carvalho, pela orientação, ensino, incentivo e oportunidade de desenvolvimento deste trabalho. À professora Dra. Mirtânia Leão, pelos ensinamentos e orientação para realização de algumas etapas deste trabalho.

Ao meu colega de trabalho, professor Msc. Raphael Cardoso, que me ajudou com as simulações e apoio para realização dessa pesquisa.

Ao Laboratório de Microestruturas e Propriedades Mecânicas da Universidade Federal de Sergipe - UFS, que permitiu a utilização do Programa Abaqus para realização das simulações.

Aos meus amigos e também professores Dr. Silvando Vieira e Dra. Raquel de Carvalho, que colaboraram e incentivaram na realização deste mestrado.

A todos os amigos e colegas que contribuíram para realização deste trabalho através de incentivos, ajuda e apoio nos momentos de dificuldades.

RESUMO

O estudo de compósito por meio da simulação computacional tem sido uma alternativa interessante, devido ao grande destaque que esse material vem recebendo atualmente. É de grande interesse da indústria a otimização de modelos confiáveis de materiais o suficiente para utiliza-los em protótipos e explorar virtualmente uma infinidade de possibilidades de composições e respostas às solicitações mecânicas. A modelagem computacional adequada para cadeira de rodas manual (CRM) nestas condições pode auxiliar no planejamento da composição final do compósito, uma vez que é possível avaliar a influência da concentração e orientação de determinados constituintes no comportamento global deste. A presente pesquisa tem como objetivo estudar a viabilidade da aplicação do Poliéster Orto-Tereftálico Reforçado com Fibra de Licuri (PORFL) na estrutura das cadeiras de rodas. Dois materiais foram submetidos à simulação computacional, sendo que o aço e o polímero (matriz do compósito) foram simulados para três modelos de CRM, com a finalidade de escolher um modelo para realização da simulação considerando o PORFL. Essas CRM foram submetidas a um carregamento de 2450N, para saber como se comportariam em relação às tensões de Von Mises (carga é distribuída pela estrutura da cadeira de rodas) e a deformação por deflexão (comportamento em deformação diante da carga aplicada). O modelo da CRM escolhido é determinado pela quantidade de pessoas que tem acesso a esse equipamento e como também pela alta tensão desenvolvida, que é de 105,29MPa para o modelo 1. Os resultados apresentam-se satisfatórios para o PORFL, pois se considerada a otimização da estrutura da CRM, o valor da tensão desenvolvida diminuiu de 104,86MPa (modelo real) para 3,0MPa (modelo otimizado). Em relação à deformação por deflexão foi reduzida de 8,82mm (modelo real) para 0,30mm (modelo otimizado). Assim, considera-se que este material pode ser utilizado na fabricação de estruturas das CRM, destaca-se ainda a possibilidade de serem realizados mais estudos para aplicação do mesmo.

Palavras-chave: Compósito polimérico; Fibra de licuri; Simulação computacional; Elementos finitos; Cadeira de rodas.

ABSTRACT

The study of composite through computational simulation has been an interesting alternative because of the emphasis this material is receiving lately. There is a huge industry interest in the optimization of reliable models of enough materials to use in prototypes and virtually explore an infinity of possibilities of compositions and answers to the mechanical demands. The computational modeling suitable for the manual wheelchair (CRM) in these conditions can help in the planning of the final composition of the composite, once it is possible to evaluate the influence of concentration and orientation of certain constituents in the global behavior of this. The goal of the present research is to study the viability of the Poliéster Orto-Tereftálico Reforçado com Fibra de Licuri (PORFL) application in the wheelchair structure. Two materials were submitted to computational simulation, the polymer and the steel (composite matrix) were simulated for three CRM models, the goal was to select only one model for the simulation considering the PORFL. Those CRM were submitted to 2450N, to know how they would behave in relation to the Von Mises stress (The charge is delivered for the structure of the wheelchair) and the deflection strain (behavior in deformation through applied charge). The CRM selected model is determined by the amount of people who have access to this equipment and also by the developed high tension, which is of 105,29MPa to the model 1. The results are satisfactory for the PORFL, because when the CRM structure optimization is considered, the developed tension value decreased from 104,86MPa (real model) to 3,0MPa (optimized model). The deflection strain was reduced from 8,82mm (real model) to 0,30mm (optimized model). So It's considered that this material can be used in the fabrication of CRM structures. Also, there is the possibility of new studies for the application.

Keywords: Polymeric Composite, Licuri Fiber, Computational Simulation, Finite Elements, Wheelchair.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos discutidos neste capítulo	24
Figura 2: Representações esquemáticas das várias características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.....	26
Figura 3: Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente	30
Figura 4: Formas de aplicação de fibras na fabricação de materiais compósitos	31
Figura 5: Classificação das fibras naturais	32
Figura 6: O licuri	36
Figura 7: A fibra de licuri.....	37
Figura 8: O exocarpo do licuri	37
Figura 9: Cadeira de Rodas	38
Figura 10: Peça desenhada em um software CAD	43
Figura 11: Peça modelada e dividida em malha de elementos finitos.....	43
Figura 12: Tensões obtidas no modelo ensaiado em software de simulação	44
Figura 13: Estado de tensão tri-axial.....	45
Figura 14: Critério de von Mises.....	47
Figura 15: Laminado compósito reforçado com tecido unidirecional de licuri	50
Figura 16: Cadeiras de Rodas referências para elaboração de modelos em CAD	52
Figura 17: Estrutura das Cadeiras de rodas em formato CAD para simulação.....	54
Figura 18: Componentes estruturais da cadeira de rodas. a) Lateral; b) Haste; c) Tesoura	55
Figura 19: Montagem da estrutura	56
Figura 20: Estrutura das Cadeiras de rodas em formato CAD para simulação.....	56
Figura 21: Representação da malha da estrutura da cadeira de rodas	57
Figura 22: Condições de contorno: engaste na base da estrutura e carga aplicada na cadeira de rodas	58
Figura 23: Elemento Infinitesimal	59
Figura 24: Indicação da diferença entre modelo real e modelo otimizado da cadeira de roda	62
Figura 25: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (a) da cadeira de rodas de aço	64
Figura 26: Deformação por deflexão para o modelo (a) da cadeira de rodas de aço	64
Figura 27: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (b) da cadeira de rodas de aço	65
Figura 28: Deformação por deflexão para o modelo (b) da cadeira de rodas de aço.....	65
Figura 29: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (c) da cadeira de rodas de aço	66

Figura 30: Deformação por deflexão para o modelo (c) da cadeira de rodas de aço	66
Figura 31: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (a) da cadeira de rodas de polímero	68
Figura 32: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (b) da cadeira de rodas de polímero	68
Figura 33: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (c) da cadeira de rodas de polímero	69
Figura 34: Deformação por deflexão para o modelo (a) da cadeira de rodas de polímero	69
Figura 35: Deformação por deflexão para o modelo (b) da cadeira de rodas de polímero	70
Figura 36: Deformação por deflexão para o modelo (c) da cadeira de rodas de polímero	70
Figura 37: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas real	73
Figura 38: Deformação por deflexão para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas real	73
Figura 39: Mudanças realizadas na cadeira de rodas otimizada	75
Figura 40: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas otimizada	76
Figura 41: Deformação por deflexão para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas otimizada	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e sintéticas.....	33
Tabela 2: Informações sobre alguns materiais utilizados em cadeira de rodas.....	39
Tabela 3: Fundamentação teórica sobre PORFL.....	42
Tabela 4: Propriedades Mecânicas da resina Novopal L-120.....	51
Tabela 5: Valores dos ensaios de tração obtidos nos trabalhos pesquisados e valor médio	51
Tabela 6: Informações utilizadas para modelar as cadeiras de rodas no software CAD	54
Tabela 7: Tipo de Malha e propriedades de cada material utilizados nas simulações das cadeiras de rodas	57
Tabela 8: Propriedades do Aço ASTM A36	61
Tabela 9: Comparativo entre os valores de Von Mises e deformação por deflexão dos três modelos para o aço	67
Tabela 10: Comparativo entre os valores de Von Mises e deformação por deflexão dos três modelos para o polímero	71
Tabela 11: Comparativo entre os valores de Von Mises e deformação por deflexão dos três modelos para o aço e o polímero.....	71
Tabela 12: Resultado dos valores de Von Mises e da deformação por deflexão para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas real	74
Tabela 13: Resultado dos valores de Von Mises e da deformação por deflexão para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas otimizada	77
Tabela 14: Resultado dos valores de Von Mises e da deformação por deflexão para todos materiais	78

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1a: Gráfico de barras dos valores da rigidez (isto é, do módulo de elasticidade) à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos19
- Gráfico 1b: Gráfico de barras dos valores da resistência (isto é, do limite de resistência à tração) à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos19
- Gráfico 1c: Gráfico de barras da resistência à fratura (isto é, da tenacidade à fratura) à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos20

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos materiais compósitos segundo a natureza dos constituintes.....	23
Quadro 2: Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos.....	26
Quadro 3: Característica e aplicação dos materiais poliméricos termofixos.....	28
Quadro 4: Tipos de resina poliéster.....	29
Quadro 5: Classificação e exemplos de fibras vegetais	36

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD = (Computer Aided Design)

cm = medida de comprimento centímetro;

CRM = Cadeira de rodas manual;

GPa = Giga Pascal;

kg = Quilograma

mm = medida de comprimento milímetro;

N = Newton (unidade de força)

MPa = Mega Pascal;

TA = Tecnologia Assistiva;

PORFL = Poliéster Orto-tereftálico Reforçado com Fibra de Licuri

LCS - Laminado Compósito de Sial

LCL - Laminado Compósito de Licuri

LISTA DE SÍMBOLOS

E = Módulo de elasticidade do material;

σ_y = Lei de encruamento do material;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Tensões máxima, média e mínima principais no ponto considerado;

$\sigma_{VM} = q$ = Tensão de Von Mises;

μ_d = Energia de distorção/deformação;

μ_{de} = Energia de distorção/deformação necessária para provocar escoamento;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO GERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	23
2.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	25
2.2.1 Polímero	27
2.2.1.1 Poliéster Insaturada	28
2.3 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS	30
2.4 FIBRAS NATURAIS	31
2.4.1 Fibras Vegetais	34
2.5 LICURI (<i>SYAGRUS CORONATA</i>)	36
2.6 CADEIRA DE RODAS	38
2.7 CADEIRA DE RODAS (CRM) x POLIÉSTER ORTO-TEREFTÁLICO REFORÇADO COM FIBRA DE LICURI (PORFL)	40
2.8 SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	42
2.9 TENSÃO DE VON MISES	45
2.10 DEFORMAÇÃO POR DEFLEXÃO	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 POLIÉSTER ORTO-TEREFTÁLICO REFORÇADO COM FIBRA DE LICURI (PORFL)	49
3.2 ESCOLHA DOS MODELOS DAS CADEIRAS DE RODAS	52
3.3 MODELAGEM DAS CADEIRAS DE RODAS NO SOFTWARE INVENTOR	53
3.4 PARÂMETROS PARA SIMULAÇÕES	55
3.4.1 Construção do modelo	55
3.4.2 Malha e propriedades dos materiais	57
3.4.3 Condições de contorno e de carregamento	58
3.5 REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	58
3.5.1 Simulações para o aço	60

3.5.2	Simulações para o polímero (Novapol L120)	61
3.5.3	Simulação para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri	61
3.6	OTIMIZAÇÃO DO MODELO (a) DA CADEIRA DE RODA	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	SIMULAÇÃO PARA O AÇO	63
4.2	SIMULAÇÃO PARA O POLÍMERO	67
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE A SIMULAÇÃO DA CADEIRA DE RODAS PARA AÇO E POLÍMERO	71
4.4	SIMULAÇÃO PARA O PORFL NA ESTRUTURA REAL	72
4.5	SIMULAÇÃO PARA O PORFL NA ESTRUTURA OTIMIZADA	74
4.6	COMPARAÇÃO ENTRE A SIMULAÇÃO DA CADEIRA DE RODAS PARA O POLI-ÉSTER ORTO-TEREFTÁLICO REFORÇADO COM FIBRA DE LICURI NA ESTRUTURA REAL E OTIMIZADA	77
5	CONCLUSÕES.....	79
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Ao estudar a evolução dos materiais é possível enxergar o quanto é importante a sua utilização para o desenvolvimento da sociedade, pois com o passar dos anos percebeu-se que avanços tecnológicos ocorrem junto à necessidade de melhorar o manuseio e a utilização dos materiais, e isso vem desde a época em que viveram os homens das cavernas até os dias atuais.

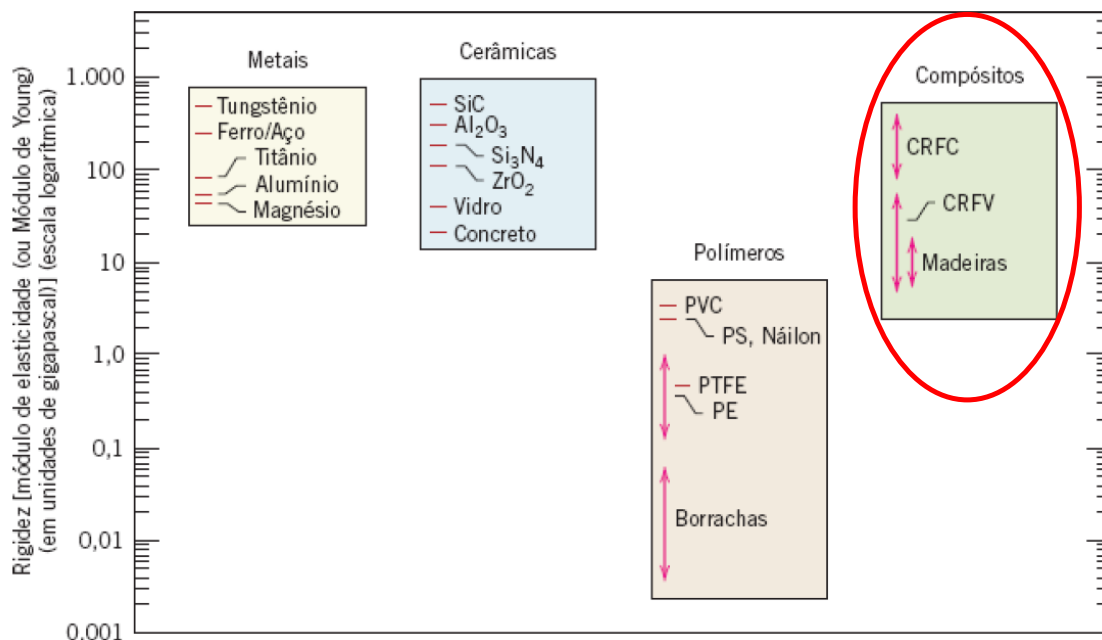
Os primeiros seres humanos começaram a desenvolver novas tecnologias para enfrentarem as adversidades existentes no período histórico em que viviam, assim iniciando a história da evolução dos materiais, a qual passou pela Idade da Pedra, pela Era dos Metais, chegando até os dias atuais, com a utilização de compósitos avançados e nanomateriais. Assim, atualmente, novos materiais estão sendo pesquisados e apresentados à humanidade, os quais têm como objetivo reduzir o consumo energético global e o impacto ambiental (JARIWALA e JAIN, 2019). Com isso, para suprir a tendência mundial, nos últimos anos tem-se buscado desenvolver novos materiais economicamente viáveis e que ao mesmo tempo correspondam às novas exigências tecnológicas e às preocupações com o meio ambiente (LEÃO, 2013).

Uma classe de materiais que vem se destacando no âmbito do desenvolvimento tecnológico são os compósitos, a formação destes é decorrente da composição de uma mistura de dois ou mais materiais, os quais se beneficiam das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos elementos dessa mistura. Eles vêm sendo utilizados em várias áreas industriais, como na engenharia, na indústria automotiva, na indústria têxtil e na construção civil, impulsionadas pela necessidade de redução do peso das estruturas e também em termos de sustentabilidade (TODKAR e PATIL, 2019).

Os compósitos vêm tendo esse destaque devido aos materiais tradicionais utilizados já não apresentarem todas as propriedades necessárias para determinadas aplicações, como em alguns setores da engenharia, que necessitam de materiais leves e ao mesmo tempo mecanicamente resistentes (WANG et al., 2005). A partir do Gráfico 1 (a), (b) e (c), observam-se algumas características mecânicas importantes dos compósitos e de outros tipos de materiais (CALLISTER, 2018). Sendo que no Gráfico 1 (a) é possível observar os valores da rigidez (módulo de elasticidade), que é uma relação entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante, a qual está relacionada com a rigidez do material ou a resistência a deformação elástica. No Gráfico 1 (b), estão apresentados os valores da resistência (limite de resistência à tração), que é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação, ou seja, a máxima tensão que pode ser sustentada por uma estrutura que se encontra sob tração. Já no Gráfico 1(c) são

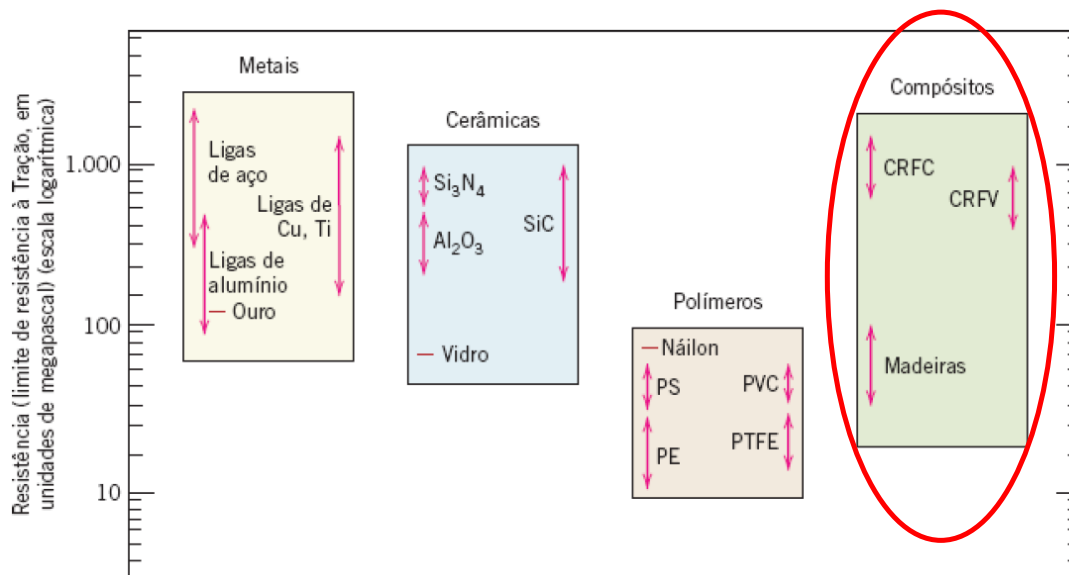
verificados os valores da resistência à fratura (tenacidade à fratura), que é definida pela mecânica da fratura como a propriedade que quantifica a resistência à propagação de uma trinca.

Gráfico 1(a): Gráfico de barras dos valores da rigidez (isto é, do módulo de elasticidade) à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos.



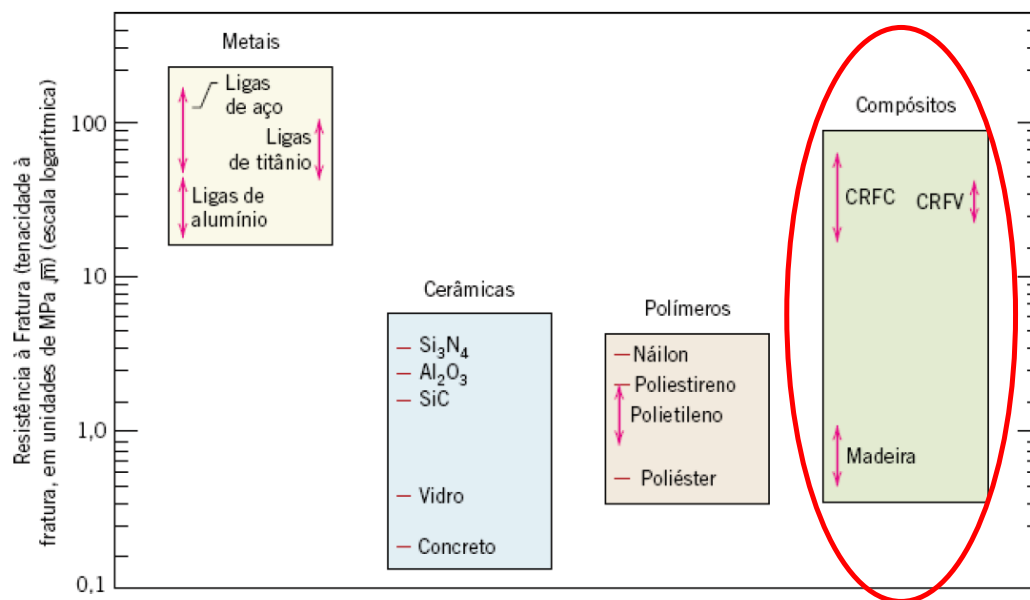
Fonte: Adaptado do Callister (2018).

Gráfico 1(b): Gráfico de barras dos valores da resistência (isto é, do limite de resistência à tração) à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos.



Fonte: Adaptado do Callister (2018).

Gráfico 1(c): Gráfico de barras da resistência à fratura (isto é, da tenacidade à fratura) à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos.



Fonte: Adaptado do Callister (2018).

Um dos tipos de materiais que vem sendo utilizado para a produção de compósitos é a fibra vegetal, pois esta possui características vantajosas como: baixo custo, leveza, boa tenacidade, boas propriedades térmicas, uso reduzido de instrumentos para o seu processamento e por gerar poucos impactos ambientais (MCGREGOR *et al.*, 2017). Desse modo, o uso desses materiais como reforço de estruturas ajudam na diminuição da dependência de materiais obtidos a partir de fontes fósseis, além de contribuir para a redução do acúmulo de materiais não biodegradáveis nos aterros sanitários (CAO *et al.*, 2008).

Os materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais vêm sendo investigados pela comunidade científica e industrial na busca de novos materiais que possam substituir eficientemente os materiais sintéticos em diversas aplicações, principalmente nas indústrias da construção civil, automobilística, aeronáutica e naval (DOS SANTOS, 2019). No Brasil, entre as fibras com maior aceitação no mercado estão as de sisal, curauá, algodão, linho, juta, rami, licuri, coco e bananeira (OLIVEIRA, 1997; LEÃO, 2009; MOTA, 2010; MOTA, 2017). A composição do material compósito da pesquisa será o poliéster orto-tereftálico com reforço de fibra de licuri (*Syagrus Coronata*), o qual será avaliado para aplicação em estrutura de cadeira de rodas.

Cadeiras de rodas manuais (CRM) são equipamentos de assistência fundamentais para os indivíduos que apresentam limitações de locomoção definitiva ou temporária nos membros

inferiores, ocasionados por doenças, traumatismos ou outras condições incapacitantes. Esses dispositivos podem ser fabricados utilizando vários materiais, entre eles estão: Aço SGP (JIS G3452), Aço STKM11A (JIS G3444), Aço SUS304, Aço A36, Alumínio A5056, Alumínio A6053-T5, Alumínio A7003-T5, Alumínio 6061-T6, Alumínio 7075, Titânio Ti-6Al-4V (SPAK, 2022).

Com a utilização desse poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri (PORFL) ocorrerá a redução do peso da cadeira de rodas e com isso espera-se facilitar a mobilidade dos cadeirantes, sendo que uma CRM fabricada com outros tipos de materiais que possuem essas características apresentam custo elevado. Além disso, os compósitos ainda apresentam a vantagem de serem descartados de forma mais adequado (reciclagem e reutilização) do que outros materiais ferrosos e não ferrosos (BRESSIANI JÚNIOR et al., 2020). E ainda terá como ponto positivo a facilidade de manutenção de partes da estrutura da CRM, devido à fibra de licuri utilizada no projeto ser barata e encontrada em grande parte do Nordeste Brasileiro. Contudo, algumas desvantagens são apresentadas na utilização destas fibras em compósitos, tais como elevada absorção de umidade, baixa temperatura de decomposição e fraca adesão entre fibra e matriz (BRESSIANI JÚNIOR et al., 2020). No entanto esse problema vem sendo contornado para permitir a utilização dessas fibras.

Assim esta pesquisa sugere como ideia central que esse PORFL seja utilizado na fabricação da estrutura da CRM, a qual passará por simulações para verificar a viabilidade de sua aplicação. O objetivo é ocasionar a acessibilidade aos cadeirantes, que terão uma CRM mais leve e que possua sua estrutura de material biodegradável, o qual facilitará a manutenção e descarte da mesma. Assim esse equipamento é muito importante, pois além da utilidade de locomoção, ele tem a função de socializar o deficiente (COTA, F. et al., 2011).

Um dos motivos para a escolha da simulação computacional nesta pesquisa se explica pela importância dessa ferramenta para a realização de testes antes das atividades práticas, as quais em muitos casos apresentam um custo elevado. Logo, a simulação computacional reduz o custo da produção. E além disso é bem mais vantajosa do que realizar um ensaio no equipamento, o que torna esse processo muito utilizado por diversas empresas com o fim de melhorar a qualidade de seus produtos e otimizar sua produção. Por meio da simulação será possível obter resultados mais eficazes sobre a aplicação do poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na estrutura da cadeira de rodas, conseguindo observar vários parâmetros para projeto da mesma, assim colaborando para futuros trabalhos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar por meio de simulação computacional a possibilidade de aplicação do poliéster orto-tereftálico reforçado com fibras de Licuri (PORFL) na construção da estrutura de sustentação de cadeiras de rodas manuais.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar três tipos (manual simples, dobráveis em X e rígidas) de cadeira de rodas manual (CRM).
- Analisar os três modelos de CRM por intermédio de elementos finitos, considerando a estrutura fabricada em aço e em poliéster orto-tereftálico, a partir da aplicação de uma carga equivalente a 2450N.
- Realizar simulação computacional em um tipo de modelo, considerando a utilização do PORFL na fabricação da estrutura.
- Verificar a possibilidade de utilização do PORFL, a partir de adaptações sugeridas na estrutura do modelo da CRM.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Nos últimos anos a utilização dos materiais compósitos está aumentando muito, pois possuem características químicas e físicas compatíveis com as de materiais unitários, a um menor preço. Isso é devido ao fato que esse material alcança uma combinação de propriedades que não é exibida por nenhum material isolado. Outra vantagem dos materiais compósitos é a incorporação das melhores características de cada um dos materiais que o compõem (CALLISTER, 2018).

Podem ser utilizados materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos para compor a melhor combinação e formar um compósito. Mota (2017) aponta em seu estudo que existem materiais compostos que são naturais e sintéticos, ver Quadro 1.

Quadro 1: Classificação dos materiais compósitos segundo a natureza dos constituintes.

Natureza dos Materiais		Exemplos	
Materiais Compósitos	Naturais	Madeira, osso, músculos	
	Sintéticos	Microcompósitos	Plástico reforçado com fibras
		Macrocompósitos	Concreto Armado

Fonte: Adaptado de Hull (1988 apud Mota 2017).

As indústrias aeroespacial, submarina, de bioengenharia e de transporte têm buscado muito a utilização dos compósitos, devido aos materiais com propriedades específicas serem necessários para uma gama de aplicações de alta tecnologia (FERREIRA, 2019), além de possuírem uma combinação formidável de características, como por exemplo: baixa massa específica, resistência à abrasão, ao impacto, rigidez e baixa corrosão (CALLISTER, 2018).

De acordo com Callister (2018), o projeto de materiais compósitos tem obtido a atenção de cientista e engenheiros para obterem novos materiais que possuam boas combinações de suas características mecânicas para serem utilizados para situações específicas. Assim:

No projeto de materiais compósitos, os cientistas e engenheiros combinam de modo engenhoso vários metais, cerâmicas e polímeros para produzir uma nova geração de materiais extraordinários. A maioria dos compósitos foi criada para melhorar combinações de características mecânicas tais como rigidez, tenacidade e resistência às condições do ambiente, como também a elevadas temperaturas (CALLISTER, 2018).

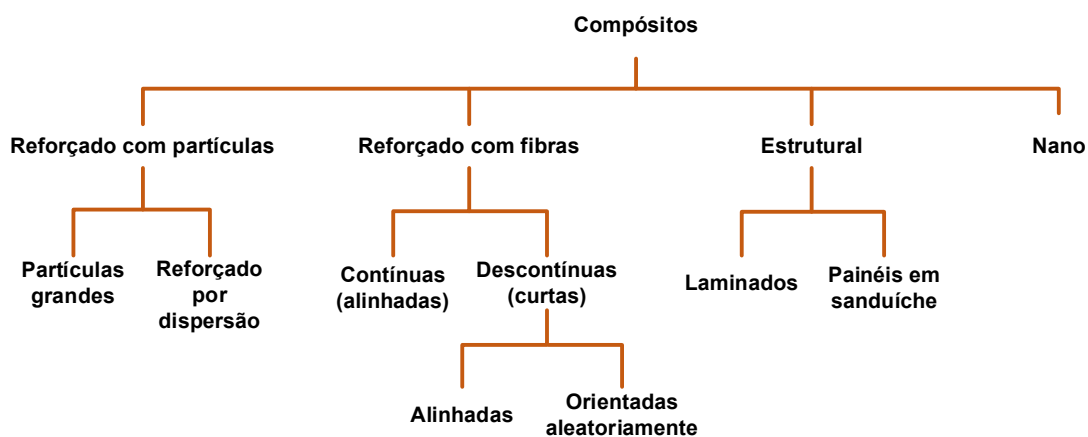
Segundo Leão (2013), ao observar a utilização de materiais compósitos percebe-se que são direcionados para a moldagem estrutural, devido a combinação de características mecânicas

de dois ou mais materiais. Dessa forma:

Os compósitos são materiais de moldagem estrutural, constituídos por uma fase contínua conhecida como matriz e que abrangem três tipos: cerâmica, polimérica e metálica; e por uma fase descontínua ou dispersa chamada de reforço, de carga ou de agregado, dependendo do tamanho ou do formato de suas partículas (LEÃO, 2013;).

Na Figura 1 nota-se um esquema simples para a classificação dos materiais compósitos, que apresenta quatro divisões principais. Nos compósitos os materiais de reforço podem ser distribuídos na matriz em forma de fibras contínuas, particuladas ou picadas, a depender das dimensões finais do material a ser obtido (FELIPE *et al.*, 2017). Fibras longas e contínuas são incorporadas a matrizes específicas, para possuírem melhores propriedades mecânicas quando aplicada uma carga na direção do seu alinhamento (HULL e CLYNE, 2019). Fibras particuladas são usadas para controlar a rigidez, resistência, tenacidade à fratura e absorção de energia ao impacto de matrizes poliméricas (JAJAM e TIPPUR, 2012; SANTANA, 2016). Fibras picadas permitem produzir componentes nas mais diversas geometrias por moldagem por injeção ou outros processos, o que as torna a forma de reforço mais frequente, com custos consideravelmente menores que as fibras contínuas (VITORINO, 2016).

Figura 1: Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos discutidos neste capítulo.



Fonte: Callister (2018).

Compósitos Particulados - Os compósitos particulados são formados por partículas de diferentes tamanhos e diferentes formas, dispersas de maneira aleatória na matriz de composição (DANIEL, 2006).

Compósitos com Fibras ou Fibroso - São constituídos por uma união de fibras longas ou curtas como material de reforço em meio de uma matriz atuante (LEÃO, 2013). A fase matriz dos compósitos fibrosos pode ser um metal, um polímero ou um cerâmico. Em geral, os metais e polímeros são empregados como matrizes, pois alguma ductilidade é desejável; nos compósitos com matriz cerâmica, o componente de reforço é adicionado para melhorar a tenacidade à fratura

(CALLISTER, 2018).

Compósitos Estruturais - São constituídos tanto por materiais homogêneos como por materiais compósitos cujas propriedades dependem não somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos estruturais (LEÃO, 2013).

Os nanocompósitos - São compostos por partículas com tamanho nanométrico (ou nanopartículas) que estão inseridas na matriz. Eles podem ser projetados para possuir propriedades mecânicas, elétricas, magnéticas, óticas, térmicas, biológicas e de transporte que são superiores às de materiais carregados convencionais; além disso, essas propriedades podem ser adaptadas para aplicações específicas (CALLISTER, 2018).

2.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

A utilização dos compósitos poliméricos teve início em meados do século XX. Pesquisas e estudos de tais materiais se desenvolveram bastante nas últimas décadas por possuir requisitos sempre considerados importantes em projetos, tais como a redução de peso, aumento da resistência química, elevada resistência mecânica e rigidez (ASHIK e SHARMA, 2015).

De acordo com Leão (2013), os compósitos poliméricos podem ser constituídos de duas fases: contínua e descontínua. Assim:

Os compósitos poliméricos são materiais de moldagem estrutural, constituídos por uma fase contínua polimérica (plástico) reforçada por uma fase descontínua fibrosa e que se agregam físico-quimicamente após um processo de polimerização (curado), ou seja, são também denominados de plásticos reforçados com fibras (LEÃO, 2013).

Consoante Silva (2014), os compósitos poliméricos podem ser divididos em dois tipos, sendo que suas características são diferenciadas quando expostos a determinadas temperaturas.

Dessa forma:

Os compósitos poliméricos podem ser divididos em termoplásticos ou termorrígidos. Sendo que a principal diferença entre estes dois tipos está no comportamento característico quando aquecidos, ou seja, os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldados várias vezes, devido às suas características de se tornarem fluidos sob ação da temperatura e depois se solidificarem quando a temperatura diminui. Já os termorrígidos não têm o comportamento de fluidos devido à presença de ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares (SILVA, 2014).

No Quadro 2 estão as principais características de polímeros termoplásticos e termorrígidos.

Quadro 2: Comparação das propriedades entre termoplásticos e termorrígidos.

Termoplásticos	Termorrígidos
Reciclável mecanicamente	Não reciclável mecanicamente
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade durante o processamento
Baixa resistência à fluência	Alta resistência à fluência
Temperatura de uso limitada à Tg e Tm. Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta estabilidade térmica e dimensional

Fonte: Alexandre (2006 apud Silva, 2014).

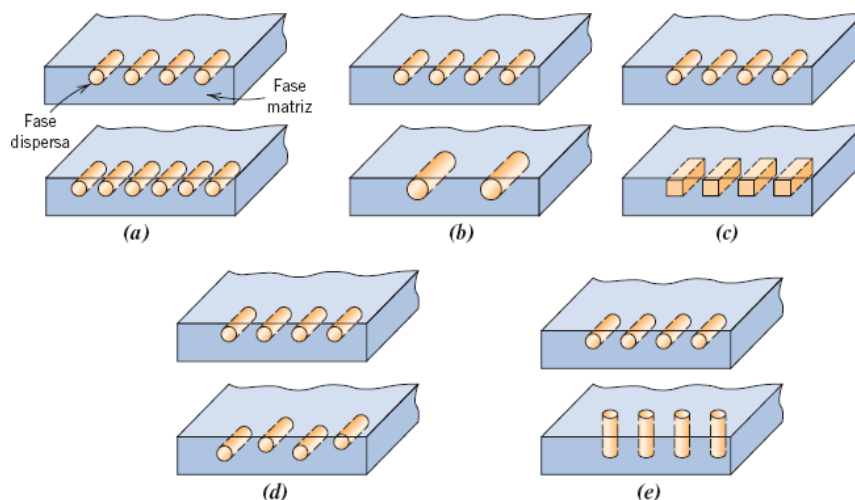
Conforme Leão (2013), a existência de vários processos de fabricação de compósitos de matriz polimérica depende do objetivo que se almeja chegar. Assim:

Existe uma considerável variedade de processos disponíveis para fabricação de compósitos de matriz polimérica. Esses processos variam desde simples técnicas manuais até métodos automatizados que permitem produzir uma grande quantidade de componentes de alta complexidade (LEÃO, 2013).

A escolha do método utilizado vai depender do custo, da forma do componente, do tamanho do lote e do desempenho exigido (FARIA, 2007 apud LEÃO, 2013).

Muitos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases: uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, frequentemente chamada de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases constituintes, de sua quantidade relativa e da geometria da fase dispersa. Nesse contexto, subentende-se por geometria da fase dispersa a forma, o tamanho, a distribuição e a orientação das partículas; essas características estão representadas na Figura 2.

Figura 2: Representações esquemáticas das várias características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.



Fonte: Callister (2018).

Segundo Leão (2013), os compósitos poliméricos apresentam inúmeras vantagens em relação aos compósitos que possuem outros tipos de matrizes, como por exemplo:

- Leveza - devido ao peso específico das resinas e das fibras de reforço;
- Resistência Química - apresenta excepcional inércia química permitindo sua utilização em ambientes agressivos quimicamente;
- Durabilidade - apresentam alta durabilidade em consequência de sua composição e a reticulação polimérica formada durante o processo de moldagem;
- Resistência Mecânica - podem apresentar alta resistência mecânica devido às suas características e a variedade de combinações que podem ser realizadas entre as resinas e os materiais de reforço;
- Resistência às Intempéries - podem apresentar resistência aos efeitos do vento, da umidade, do sol e das oscilações térmicas. Além disso, quando características não usuais são requeridas, aditivos como protetores de UV, agentes antipoeira, resinas especiais são amplamente utilizáveis;
- Facilidade na Manutenção - apresentam fáceis e simples técnicas de reparo e manutenção;
- Flexibilidade Arquitetônica – os compósitos poliméricos têm uma grande vantagem sobre outros materiais estruturais, pois moldes com formas complexas são facilmente adaptáveis aos processos em utilização.

2.2.1 Polímero

Conforme Callister (2018), a definição para os polímeros esta dividida em duas famílias, e que se baseiam em compostos orgânicos. Deste modo:

Os polímeros incluem os familiares materiais plásticos e de borracha. Eles são compostos orgânicos que têm sua química baseada no carbono, no hidrogênio e em outros elementos não metálicos (por exemplo, O, N e Si). Além disso, eles têm estruturas moleculares muito grandes, em geral na forma de cadeias, que com frequência possuem uma estrutura composta por átomos de carbono ligados sequencialmente entre si ao longo da cadeia principal (CALLISTER, 2018).

Após 1930 ocorreu a produção em grande escala das matrizes poliméricas, quando os plásticos modernos se desenvolveram com a criação da química orgânica (OLIVEIRA FILHO, 2019). A expressão “Polímero” foi criada por Berzelius, em 1832, em oposição ao isômero, para fixar conjuntos de pesos moleculares múltiplos, ou de mesmo peso molecular (RAMOS, 2007, OLIVEIRA FILHO, 2019).

Segundo Canevarolo Jr (2006) e Oliveira Filho (2019), os polímeros, quanto ao

comportamento mecânico, são classificados da seguinte forma:

Termoplásticos - Podem ser repetidamente conformados mecanicamente, através de variação de temperatura e pressão, podendo ser submetidos a novas temperaturas e pressão para produzirem o mesmo efeito de amolecimento e fluxo. Esse procedimento é uma forma reversível (transformação física). Ex: polietileno, policloreto de vinila (PVC), polipropileno e poliestireno;

Termorígidos - São conformáveis plasticamente apenas em um estágio intermediário de sua fabricação. O produto final é duro e não amolece mais com o aumento da temperatura. Uma conformação plástica posterior não é possível. Não são recicláveis. Os termorígidos são completamente amorfos, por não apresentar estrutura cristalina. Podem ser chamados de Termofixos. Ex: baquelite, resinas epoxídicas, poliésteres e poliuretanos;

Elastômeros (borrachas) - Materiais conformáveis plasticamente que se alongam elasticamente de maneira acentuada até a temperatura de decomposição e mantém essas características em baixas temperaturas. São parcialmente cristalinos, semelhantes aos termoplásticos. Ex: borracha natural, neopreno, borracha de estireno, borracha de butila e borracha denitrile.

Segundo Shackerlford (2008) e Oliveira Filho (2019), o Quadro 3 apresenta as principais características e aplicações dos termofixos mais utilizados, ressaltando que algumas aplicações já estão bem mais desenvolvidas devido aos avanços tecnológicos.

Quadro 3: Característica e aplicação dos materiais poliméricos termofixos.

Polímero Termofixo	Características e Aplicações
Epóxis	Alta Resistência (para recipientes feitos por bobinagem)
Poliésteres	Para estruturas gerais (normalmente usada para reforço de tecido)
Fenólicos	Aplicações em altas temperaturas
Silicones	Aplicações elétricas (Usada em placas de circuito impresso)

Fonte: Adaptado de Shackerlford (2008 apud Oliveira Filho, 2019).

2.2.1.1 Poliéster Insaturada

Poliéster é uma categoria de polímeros obtidos por meio de uma reação de condensação entre um poliálcool e um ácido policarboxílico. O tipo de ácido influencia nas propriedades finais das resinas poliésteres ortoftálicas, isoftálicas e tereftálicas (MOTA, 2017). Ambos os constituintes principais, reagentes, que darão origem às resinas em questão são insaturados, ou seja, contêm uma ligação dupla relativa 43 entre os átomos de carbono, sendo a resina resultante insaturada (SILVA, 2009). O Quadro 4 apresenta algumas resinas do tipo poliéster insaturada.

Quadro 4: Tipos de resina poliéster.

Tipos	Comentários
Ortoftálica	A mais comum e de menor custo
Tereftálica	Baixa resistência UV, resistência física pouco superior à anterior
Isoftálica	Melhores características físicas, mecânicas e térmicas que as anteriores

Fonte: Adaptado de Silva (2009 apud Mota, 2017).

O fornecimento dessas resinas são no estado líquido e exige a presença de agente catalisador estireno (monômero vinílico) para reduzir a viscosidade do produto, além de produzir a reação de cura (CONCEIÇÃO, 2021). A reação de cura de uma resina poliéster consiste na copolimerização do monômero vinílico com a dupla ligação do poliéster, formando uma rede tridimensional, resultando em um material sólido (CASTRO, 2013 apud CONCEIÇÃO, 2021).

Segundo Leão (2013), algumas propriedades das resinas poliéster insaturadas podem ser ressaltadas abaixo:

- Boas propriedades mecânicas como tração, flexão e impacto;
- Não condutor de corrente elétrica;
- Flexibilidade de projeto, inclusive para modificações posteriores;
- Estabilidade dimensional;
- Baixa absorção de água;
- Resistência à corrosão e oxidação;
- Nenhuma restrição ao tamanho e formato da peça;
- Moldes simples e baratos e de confecção própria;
- Baixo investimento em equipamentos;
- Boa relação custo-benefício;
- Ótimo acabamento superficial;
- Peças translúcidas.

Especialmente quando reforçadas com fibras a utilização em larga escala da resina poliéster, deve-se ao baixo custo, cura rápida e boa processabilidade da mesma (CONCEIÇÃO, 2021). Sendo que as principais aplicações da resina poliéster reforçadas com fibras incluem: remos, carcaças de caminhões, artigos esportivos, cadeiras, calhas, entre outros (SANTOS, 2017 apud CONCEIÇÃO, 2021).

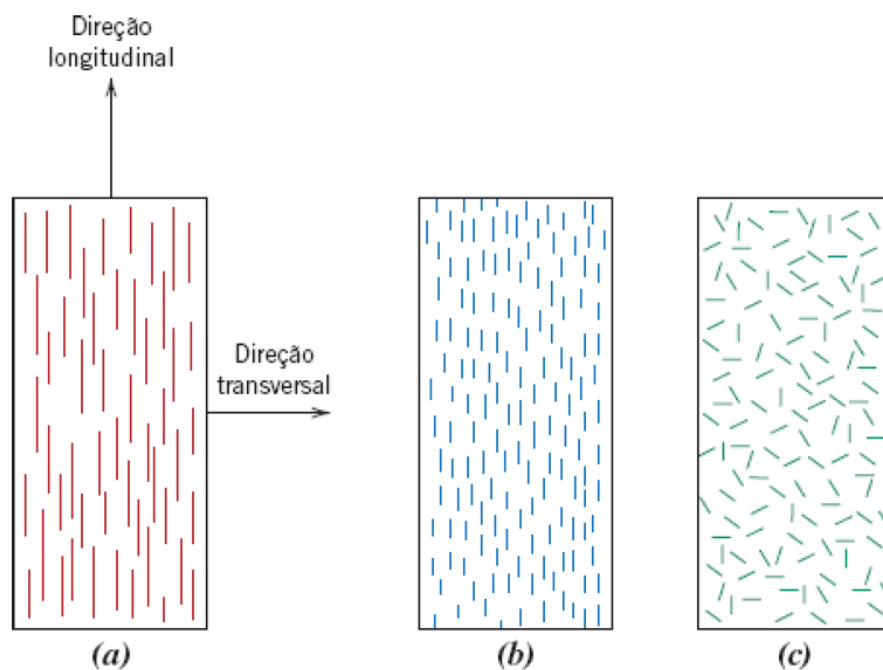
2.3 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS

Os compósitos poliméricos reforçados por fibras têm sido fonte de muitas pesquisas. Isso se dá devido à necessidade de materiais que tenham características específicas para determinadas situações, as quais requerem propriedades mecânicas que dependem de fatores como: orientação das fibras, comprimento, distribuição, interação matriz/fibra, fração volumétrica dos componentes da mistura e composição química da matriz e das fibras (LEÃO, 2013).

Os materiais compósitos reforçados por fibra têm despertado grande interesse na engenharia da indústria de diversos setores, tais como a farmacêutica, automotiva, aeroespacial, construção civil, metalúrgica, mecânica, aeronáutica, naval, entre outras (DOS SANTOS, 2019).

Assim, os compósitos reforçados com fibras são agrupados ainda em função da orientação do reforço, que podem ter as seguintes representações: fibras alinhadas e longas, fibras alinhadas e curtas e fibras aleatórias e curtas, conforme Figura 3.

Figura 3: Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.



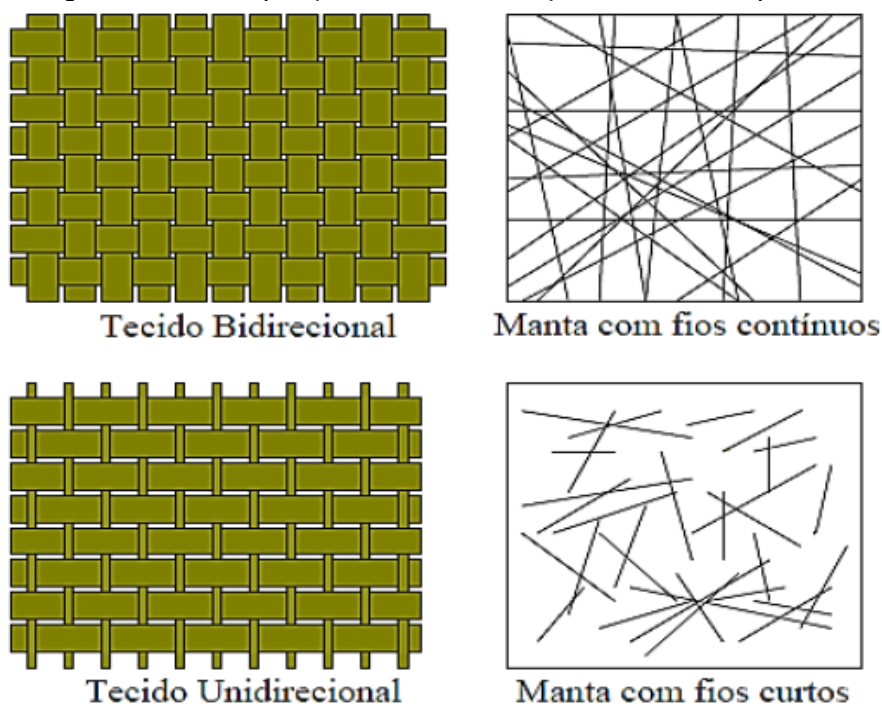
Fonte: Callister (2018).

Em materiais compósitos, a aplicação das fibras pode ser feita de modo disperso ou na forma de mantas (com fibras curtas ou longas) e em tecidos. E de acordo com a forma que as fibras são distribuídas, como relatado anteriormente, realçam-se algumas propriedades desejadas ao compósito.

Entre os principais efeitos esperados no reforço por fibras estão o aumento da rigidez (módulo de elasticidade) e da resistência mecânica do polímero. Em alguns casos de composição, por exemplo, os biocompósitos, esse aumento nas propriedades pode não ocorrer, já que o objetivo central na concepção desse tipo de material é atender à propriedade de degradabilidade da maioria deles (LEÃO, 2013).

Algumas formas de disponibilidade de fibras na fabricação de materiais compósitos estão mostradas esquematicamente na Figura 4.

Figura 4: Formas de aplicação de fibras na fabricação de materiais compósitos.



Fonte: Chou et al. (1986 apud Leão, 2013).

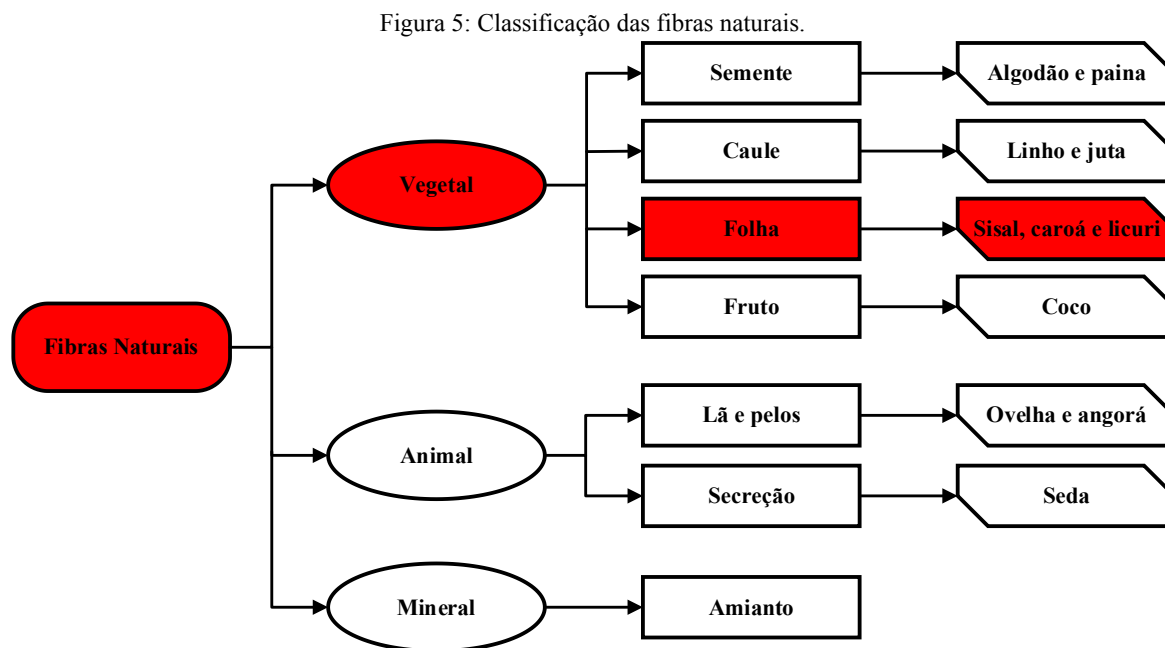
2.4 FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais têm obtido destaque por possuírem as seguintes características: serem um material biodegradável, de baixo custo e uma fonte renovável (LEÃO, 2013).

As fibras naturais podem ser de três tipos, como mostrado na Figura 5: de origem animal, obtidas dos pelos de animais ou produzidas por eles; de origem vegetal, provenientes de diferentes partes das plantas como, por exemplo, sementes, caule e até mesmo flores e folhas; e de origem mineral, que podem ser obtidas a partir de minérios como basalto e amianto.

Para esta pesquisa, por ser encontrada em grande parte do território baiano, a fibra escolhida foi de origem vegetal, derivada da planta denominada licurizeiro. Assim os trabalhos

que serviram de base para fundamentar a pesquisa utilizaram as fibras das folhas para produção do compósito. Na Figura 5 destacou-se onde se encontra esta fibra de licuri na classificação das fibras naturais.



Fonte: Adaptado de Dos Santos (2019).

Por apresentarem baixo custo, serem não tóxicas, biodegradáveis, passíveis de incineração e reciclagem, as fibras naturais (Tabela 1) têm sido fonte de várias pesquisas (THOMAS, 2011; LEÃO, 2013).

Consoante Braga (2010 apud Leão, 2013), em relação a substituição das fibras sintéticas utilizadas em compósitos, pode-se afirmar que:

As fibras naturais estão sendo utilizadas para obtenção de compósitos, com reforço em polímeros e substituindo parcialmente as fibras sintéticas como kevlar, boro, carbono, vidro, nylon e amianto, as quais, apesar de possuírem boas características mecânicas, contêm um custo elevado, não são biodegradáveis, possuem alta densidade, geram produtos com um custo muito alto de reciclagem, são abrasivas aos equipamentos de processamento, além de algumas dessas fibras comprometerem a saúde humana (BRAGA, 2010 apud LEÃO, 2013).

Tabela 1: Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e sintéticas.

Fibra	Densidade (g/cm³)	Resistência (MPa)	E (GPa)	Deformação específica à Ruptura	Fonte
Piçava	1,05	97 - 173	6,1	3,4	Miranda, 2011
Curauá	-	81 - 315	5,0 - 8,0	2,0 - 4,0	Spinacé <i>et al.</i> 2009
Juta	1,3	393 - 773	13	1,5 - 1,6	Bledski e Gassan, 1999
Sisal	1,5	343 - 357	12,8	6,0 -7,0	Idicula <i>et al.</i> 2006
Banana	1,35	543,3 - 556,7	20	5,0 - 6,0	Idicula <i>et al.</i> 2006
Abacaxi	1,53	405 - 421	4,2	3,0 - 4,0	Idicula <i>et al.</i> 2006
Linho	1,5	345 - 1035	27,6	2,7 - 3,2	Eichhorn <i>et al.</i> 2001
Algodão	1,5-1,6	287 - 597	5,5 -12,6	7,0 - 8,0	Eichhorn <i>et al.</i> 2001
Vidro	2,5	2492 - 2508	56 - 72	3,0 - 4,0	Eichhorn <i>et al.</i> 2001
Carbono	1,4	4000	230 - 240	1,4 -1,8	Idicula <i>et al.</i> 2006
Licuri	1,46	252 - 836,6	5 -11,8	2,5 - 4,1	Ricl, 2009

Fonte: Adaptado de Thomas (2011).

Segundo Dos Santos (2019), a utilização das fibras vegetais possuem as seguintes vantagens:

- São materiais renováveis e biodegradáveis;
- Sua disponibilidade pode ser considerada ilimitada;
- Devido à sua grande diversidade, existe enorme potencial para a descoberta de fibras com propriedades desejáveis (resistência mecânica, estabilidade química e biológica, resistência à abrasão e cisalhamento, etc.);
- São menos abrasivas que as fibras artificiais e assim, geram um menor desgaste nos equipamentos envolvidos no seu processamento ou do compósito;
- Possuem baixa densidade e alta deformabilidade;
- Apresentam baixo custo em relação aos reforços atualmente empregados.

Em diversos estudos e pesquisas científicas busca-se o uso de matérias-primas providas de fontes renováveis, devido ao seu potencial na substituição de produtos sintéticos. As expectativas para o uso de fibras naturais são muito grandes em diversas áreas como, por exemplo, na indústria automobilística, construção civil, indústria têxtil, indústria aeronáutica e na área de revestimento interno de automóveis. Nos últimos anos, o uso de fibras naturais como curauá, coco, sisal, rami, bagaço de cana-de-açúcar, juta, licuri e abacaxi como reforço em materiais poliméricos teve um acelerado crescimento (SILVA, 2014).

2.4.1 Fibras Vegetais

As fibras vegetais atraem interesse desde a década de 1980. No entanto, a atenção aumentou novamente nos últimos anos devido ao fato de essas fibras serem provenientes de fontes renováveis, biodegradáveis, recicláveis e representarem uma nova fonte de renda para população rural, além de trazerem economia de energia por meio da redução de peso dos componentes (LEÃO, 2009; MOTA, 2017; CONCEIÇÃO, 2021). Outro fator importante sobre as fibras vegetais é se apresentarem como um material abundante e disponível em praticamente todo o mundo, principalmente no Norte e Nordeste do Brasil (LEÃO, 2013).

Em conformidade com Leão (2009), os componentes químicos presentes nas fibras vegetais são substâncias polares, que alteram de acordo com a região, tipo de solo e fatores climáticos. Dessa maneira:

Os principais componentes químicos das fibras vegetais são substâncias polares, tais como a celulose, a hemicelulose (ou polioses) e a lignina, com menores percentuais de outros componentes como pectina, cera e substâncias solúveis em água. A composição química varia ligeiramente de acordo com a região de cultivo, tipo de solo e condições climáticas (LEÃO, 2009).

Em geral, o teor de celulose varia entre 60-80%, o teor de lignina em torno de 5-20%, enquanto que outras misturas cerca de 20%, exceto para algumas espécies de algodão, onde o teor de celulose pode chegar a até 95% (LEÃO, 2009; MOTA, 2017).

As fibras vegetais são basicamente constituídas de celulose, hemicelulose, lignina, além de pectina, cera, sais inorgânicos e substâncias nitrogenadas (FUENTES *et al.*, 2016). Segundo Leão (2013), as propriedades de cada componente químico das fibras vegetais são descritas a seguir:

Celulose - A celulose é o polissacarídeo mais abundante da natureza e a molécula orgânica mais abundante da face da terra (ROWELL *et al.*, 2005). Sua cadeia é formada por unidades de b-Dglicose, formando um polímero de alto peso molecular (**300.000 a 500.000 g/mol**) (PARUL e GUPTA, 2017). É o principal componente da parede celular da fibra, com estrutura linear e constituída por um único tipo de unidade de açúcar. Tem uma grande importância tecnológica por ser base de uma gama de produtos, como papel, fibras e aditivos (QUINAYÁ *et al.*, 2017).

As cadeias de celulose nas paredes celulares das plantas são arrançadas compactamente, de modo que suas fibras apresentam regiões nitidamente cristalinas, devido ao elevado número de ligações de hidrogênio que resulta na forte interação entre suas moléculas, embora medidas de

raios-X indicam que a cada 600 Å de celulose cristalina a estrutura apresenta regiões amorfas (PENEDO, 1980 apud LEÃO, 2013).

Hemicelulose - Hemiceluloses também são polissacarídeos que diferem da celulose por serem constituídas por vários tipos de unidades de açúcares, além de serem ramificados e presentes na madeira em menor grau de polimerização (**peso molecular entre 25.000 e 35.000 g/mol**) envolvendo as fibras da celulose (MOKHOTHU e JOHN, 2015).

As hemiceluloses são intimamente relacionadas com a celulose e contribuem com os componentes estruturais da árvore. A principal diferença entre as hemiceluloses e a celulose deve-se ao fato de que as hemiceluloses apresentam várias unidades de açúcares diferentes de cinco ou seis átomos de carbono (SANTOS *et al.*, 2001 apud LEÃO, 2013).

A hemicelulose é o componente responsável pela biodegradação, absorção de umidade e degradação térmica da fibra (LEÃO, 2009; GUPTA e SRIVASTAVA, 2016).

Lignina - A lignina (do latim *lignum*, que significa madeira), também conhecida como lenhina, é uma molécula tridimensional amorfa observada nas plantas terrestres, em associação com a celulose na parede celular, de natureza polimérica e tridimensional, com finalidade de conferir rigidez, impermeabilidade e resistência contra ataques biológicos aos tecidos vegetais. Esta molécula é o terceiro componente mais importante encontrado na madeira, correspondendo entre **15 e 35%** de seu peso.

Sua concentração na lamela média é alta e baixa na parede secundária. Mas, devido à sua espessura, pelo menos 70% da lignina está localizada na parede secundária. Conclui-se que a lignina é resultante do metabolismo da planta, pois quando o processo de lignificação é completado, geralmente coincide com a morte da célula, formando o chamado tecido de resistência.

A lignina se apresenta como o componente mais hidrofóbico da madeira, atuando como material cimentante ou adesivo entre as fibras, além de conferir dureza e rigidez à parede celular, sendo o último material lignocelulósico a se degradar (PETTERSEN, 1984; SMITH e HASHEMI, 2012).

A lignina é formada apenas em plantas vasculares, que desenvolvem tecidos especializados em funções como o transporte de soluções aquosas e suporte mecânico; ou seja, possui como função proteger os componentes vasculares da planta, pois reduz a permeabilidade da parede celular à água, protegendo a madeira contra microrganismos (agindo como um fungicida) e dá suporte para a árvore, suportando sua copa a muitos metros de altura.

Extrativos vegetais - Os extrativos são compostos químicos da parede celular, geralmente formados a partir de graxas, ácidos graxos, álcoois graxos, fenóis, terpenos, esteroides, resinas ácidas, resinas, ceras, e alguns outros tipos de compostos orgânicos. Estes compostos existem na forma de monômeros, dímeros e polímeros. Em geral, as coníferas têm mais extrativos que as folhosas. A maioria dos extrativos, tanto nas coníferas como nas folhosas, está localizada no cerne (heartwood) (sem considerar a casca), e alguns são responsáveis pela cor, odor e durabilidade da madeira (SHARMA, 2014). A diferença qualitativa dos extrativos entre as espécies é baseada na quimiotaxonomia, taxonomia baseada nos constituintes químicos (ROWELL *et al.*, 2005).

2.5 LICURI (*SYAGRUS CORONATA*)

O licuri (licurizeiro, ouricuri ou coqueiro-cabeçudo - *Syagrus coronata*, Figura 6) é uma planta nativa do semiárido e é encontrada em boa parte do Nordeste (exceto Maranhão) e parte do Sudeste (norte de Minas Gerais e Espírito Santo) do Brasil (DRUMOND, 2007; THOMAS, 2011, CONCEIÇÃO, 2021). Segundo Drumond (2007), o Nordeste é a região com maior concentração de licurizeiros.

Figura 6: O licuri.



Fonte: Mota (2017).

Essa palmeira se reproduz pela ação de animais, tanto animais ruminantes como também algumas espécies de pássaros (MOTA, 2017). Isso demonstra que essa vegetação nativa da caatinga se reproduz de forma natural, sem a necessidade da ação humana, não existindo fazendas que plantam licuri.

São plantas que medem de 8 a 11 metros de altura, com folhas que podem chegar a 3 metros de comprimento (LEÃO, 2009; MOTA, 2017), e de 15 a 25 centímetros de diâmetros (LEÃO, 2013). Os frutos são elipsoides, amarelados, também amarronzados, de 2,5 a 3,0 cm de comprimento, com mesocarpo suculento adocicado (LORENZI, 2010; LEÃO, 2013, DOS SANTOS, 2019).

Um ponto importante a salientar é que boa parte dessa palmeira vem sendo utilizada para confecção de produtos. Do fruto pode-se produzir óleo e sabão e da amêndoa pode-se produzir cocadas, licores e leite, além de ser usada em vários pratos típicos da culinária nordestina (THOMAS, 2011). A cera é extraída da folha para móveis, pintura de automóveis, graxa para sapatos e na fabricação de papel carbono (CONCEIÇÃO, 2021). Já as folhas são aproveitadas na produção de produtos utilitários e artesanatos como chapéus, sacolas, cestas, esteiras e vassouras (CONCEIÇÃO, 2021). As folhas trituradas são usadas como ração animal (THOMAS, 2011).

Recentemente, as fibras das folhas (Figura 7) e também o exocarpo (Figura 8) do licuri vêm ganhando espaço na participação de outras aplicações tecnológicas e têm sido utilizados para produção de compósitos empregados em diversas áreas, como, por exemplo, na construção civil.

Figura 7: A fibra de licuri obtida a partir das folhas.



Fonte: Leão (2009).

Figura 8: O exocarpo do licuri.

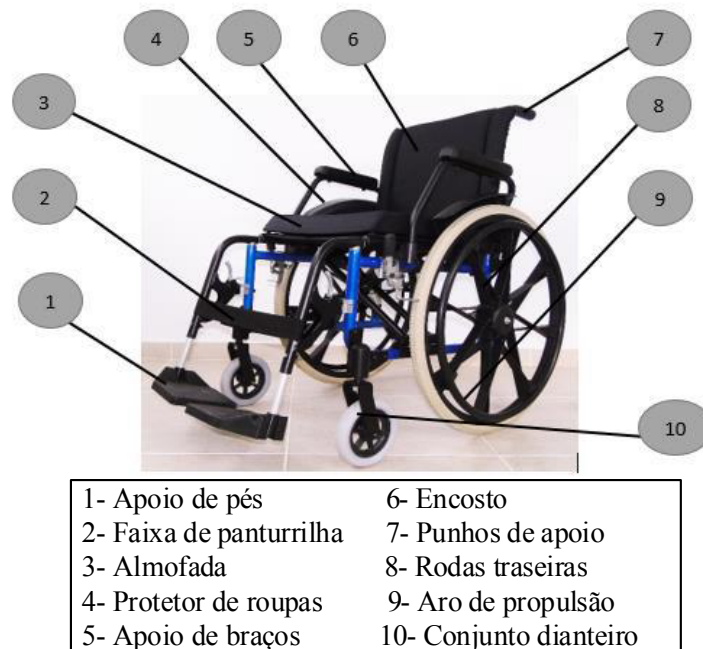


Fonte: Mota (2017).

2.6 CADEIRA DE RODAS

Cadeiras de rodas manual (CRM), Figura 9, são mecanismos de assistência fundamentais para os indivíduos que possuem restrições de locomoção definitiva ou temporária nos membros inferiores, causadas por doenças, traumatismos ou outras condições incapacitantes (SPAK, 2022). Em torno de 10% da população global apresenta algum tipo de deficiência, e cerca de 10% dessa população com deficiência, utiliza cadeira de rodas (MISTARIHI *et al.*, 2020).

Figura 9: Cadeira de Rodas.



Fonte: adaptado de ACADEF (2023).

A Tecnologia Assistiva (TA) é uma área de pesquisa, análise e desenvolvimento que tem como objetivo viabilizar auxílio às pessoas que portam as mais variadas formas de deficiências (SILVA, 2019). Bersch (2017) exemplifica que este tipo de tecnologia é semelhante às ferramentas que são utilizadas no cotidiano, como um veículo, que tem como finalidade tornar a vida mais fácil.

A CRM é uma tecnologia assistiva, considerada um equipamento médico durável, que deve atender às necessidades de conforto, mobilidade, independência e segurança dos usuários, e também possuir qualidade, sendo capaz de suportar o uso repetitivo com o mínimo de reparos (YUAN *et al.*, 2014; FITZGERALD *et al.*, 2001).

Em conformidade com Cota (2011), algumas reduções de custo realizados pelos fabricantes prejudicam na realização de um produto de boa qualidade. Deste modo:

Existe uma busca exagerada pela redução de custos pelos fabricantes de CRM, os quais

almejam utilizar materiais e processos mais baratos, que menosprezam a estabilidade, durabilidade, conforto e as necessidades dos usuários, assim ocasionando um produto de má qualidade. Além da má qualidade, um grande problema causado pelo uso de materiais de baixo valor é o elevado peso do produto, o que torna mais difícil o manuseio e exige um maior esforço para locomoção dos usuários (COTA *et al.*, 2011).

Segundo Mendes e Tibúrcio (2016), se os projetos das TA tivessem aplicações de forma mais particular aos indivíduos, estes desfrutariam de uma melhor interação entre equipamento e ambiente.

Então, CRM inadequadas afetam a independência do usuário, gerando dificuldade de movimentação e colaborando para a realização de esforços repetitivos que causam fadiga, dores e lesões nos membros superiores (AHMAD *et al.*, 2017; HYBOIS *et al.*, 2019; MISTARIHI *et al.*, 2020).

Quando a CRM é apropriada às necessidades de mobilidade e conforto, o usuário inclina-se a utilizá-la com mais facilidade e independência. Uma CRM mais eficiente permite que a capacidade funcional seja elevada, permitindo menor esforço do usuário (SPRIGLE, 2009). Ter o dispositivo de mobilidade compatível possibilita a melhoria do convívio social do usuário, deixando-o mais ativo e independente (WARD *et al.*, 2010; HYBOIS *et al.*, 2019).

A resistência do material a ser aplicado na confecção da estrutura da cadeira de rodas é um aspecto importante, tendo em vista a forma de sua utilização. Segundo Gunawarman *et al.* (2005), Usma-Alvarez *et al.* (2010) e Mistarihi *et al.* (2020) a resistência do material é um dos principais requisitos para a confecção de cadeira de rodas. Segundo Gunawarman *et al.* (2005) o peso da cadeira de rodas é um dos aspectos mais importantes para o cadeirante. Assim, a densidade do material a ser utilizado para a fabricação da cadeira de rodas também deve ser um dos pontos que devem passar por verificação. A Tabela 2 mostra alguns materiais que são mais utilizados em cadeira de rodas, desde materiais de baixo custo a um custo mais elevado.

Tabela 2: Informações sobre alguns materiais utilizados em cadeira de rodas.

Materiais	Resistência (MPa)	Densidade (g/cm³)
Aço SGP (JIS G3452)	290	7,85
Aço STKM11A (JIS G3444)	290	7,88
Aço SUS304	627	7,93
Aço – A36	400	7,85
Alumínio A5056	290	2,64
Alumínio A6053-T5	185	2,69
Alumínio A7003-T5	360	2,79
Alumínio 6061-T6	310	2,71
Alumínio 7075-T6	572	2,8
Titânio Ti-6Al-4V	950	4,43

Fonte: Adaptado de Spak (2022).

Se você tem o objetivo de comprar uma cadeira de rodas, certifique-se de que ela seja de boa qualidade. Desta forma, é importante olhar para os materiais utilizados na fabricação destes produtos. É importante verificar o desempenho e as características, que variam de acordo com o material escolhido e influencia no valor da CRM, como destacado a seguir:

Cadeiras de rodas de aço: As CRM de aço são as mais robustas. Entretanto, as cadeiras de rodas de aço não são um exemplo de leveza. Faixa de preço de R\$ 579,00 a R\$ 2.300,00, dependendo do modelo que o usuário deseja. Quanto mais cara, mais sofisticada a CRM.

Cadeiras de rodas de alumínio: As CRM de alumínio são robustas, mas menos pesadas do que as cadeiras de rodas de aço. Por causa disso, as cadeiras de rodas de alumínio são fáceis de transportar. Faixa de preço de R\$ 699,00 a R\$ 8.999,00, dependendo do modelo que o usuário deseja. Quanto mais cara, mais sofisticada.

Cadeiras de rodas em titânio: As CRM em titânio são muito leves, mas sem comprometer a força. Isto torna as cadeiras de rodas de titânio muito fáceis de transportar e manusear. Faixa de preço de R\$ 15.000,00 a R\$ 50.000,00, dependendo do modelo que o usuário deseja. Quanto mais cara, mais sofisticada.

2.7 CADEIRA DE RODAS (CRM) x POLIÉSTER ORTO-TEREFTÁLICO REFORÇADO COM FIBRA DE LICURI (PORFL)

Como surgiu a ideia de relacionar compósito reforçado com fibra de licuri (CPRFL) com cadeira de rodas (CRM)? Iniciar o presente tópico com essa pergunta é muito importante para embasar essa pesquisa. Com base em alguns trabalhos conseguiu-se pensar na utilização desse compósito em CRM.

Nos trabalhos de Cota *et al.* (2011), Silva (2019) e Spak (2022), observamos como é interessante atentar-se para utilização da CRM e como pensar em projetos que possam trazer acessibilidade e melhorias a elas, atentando-se para utilização do material como também para a estrutura de cadeira de rodas.

Cota *et al.* (2011) realizou uma análise por meio de simulação por elemento finitos da estrutura de uma cadeira de rodas, dividindo-a em três partes: lateral, haste e tesoura. Já Silva (2019) resolveu projetar uma cadeira automatizada de baixo custo feita em material de PVC. E Spak (2022) utilizou uma metodologia de apoio à tomada de decisão para a seleção de materiais (aços, ligas de alumínio e titânio) no desenvolvimento de projetos de cadeiras de rodas, nos quais empregou o método multicritério de tomada de decisão *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, o

qual considera critérios quantitativos e qualitativos predeterminados para classificar as alternativas analisadas.

Já nos trabalhos de Leão (2009), Thomas (2011), Leão (2013), Santos et. al. (2015), Moraes et. al. (2018) e Conceição (2021) percebe-se como a utilização de novos materiais, como compósitos a base de polímeros reforçado com fibra de licuri, têm sido muito utilizados para serem aplicados em diversas situações por apresentarem características essenciais para os dias atuais, como propriedades mecânicas e também por ser um produto biodegradável.

Leão (2009) investiga a busca por reforços naturais alternativos aos compósitos poliméricos, também denominados de polímeros reforçados, realizando um completo estudo de caracterização microestrutural da fibra de licuri, como proposta alternativa de reforço aos compósitos poliméricos. Thomas (2011) utilizou uma resina poliéster insaturada, reforçada com tecidos unidirecionais de fibras de licuri, investigando a influência de tratamentos na aderência interfacial, sendo que os tratamentos foram selecionados a partir de critérios ambientais e econômicos. Leão (2013) procedeu com um completo estudo de caracterização microestrutural da fibra de licuri, como proposta alternativa de reforço aos compósitos poliméricos. Como segunda parte, realizou um estudo do desenvolvimento de dois laminados compósitos, um somente a base de fibra de licuri e um laminado híbrido a base de fibra de licuri e fibra de vidro. E, de modo a conhecer o comportamento da fibra de licuri frente ao processo de hibridização. Santos et al. (2015) avaliou as propriedades mecânicas de compósitos de poliéster reforçados com fibras de Licuri por meio de ensaio de tração, utilizando o menor nível possível de etapas no processo tecnológico para obtenção de um material tecnicamente viável. Métodos quantitativos e qualitativos foram utilizados, comparando parâmetros obtidos em compósitos desenvolvidos por outras literaturas. Moraes et al. (2018) buscou fazer uma análise da influência da umidade no desempenho mecânico de um laminado compósito unidirecional de matriz de poliéster reforçado com fibras de licuri. E por fim, Conceição (2021) avaliou o comportamento de absorção de água e seu efeito nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com tecidos unidirecionais de sisal (LCS - Laminado Compósito de Sisal) e de licuri (LCL - Laminado Compósito de Licuri).

A simulação computacional desse PORFL foi com o objetivo de ver suas propriedades mecânicas sendo avaliadas diante uma aplicação real em uma CRM. Assim utilizou-se o módulo de Young que foram obtidos por meio do ensaio de tração do poliéster reforçado com fibra de licuri, apresentados nas pesquisas para fundamentar esse trabalho e representados na Tabela 3. Outros fatores que foram de grande importância para fundamentar ainda mais essa ideia é que ainda existem muitos fatores que podem melhorar os resultados do módulo de elasticidade, tais

como o processo de fabricação deste compósito (que na maioria dos trabalhos foi laminação manual), os tratamentos das fibras, as avaliações técnicas de aderência entre matriz e reforço, a orientação da direção das fibras no tecido (unidirecional), a quantidade de tecidos da fibra de licuri (boa parte dos trabalhos utilizaram dois tecidos), etc.

Tabela 3: Fundamentação teórica sobre PORFL.

	Ensaio de tração (MPa)	Ensaio de flexão (MPa)	Fonte
POLIÉSTER ORTO-TEREFTÁLICO REFORÇADO COM FIBRA DE LICURI	36,10 ± 2,26	87,10 ± 10,74	Leão, 2009
	54,00 ± 11,6	-	Thomas, 2011
	59,20 ± 7,5	-	Thomas, 2011
	41,90 ± 2,51	58,75 ± 1,92	Leão, 2013
	16,97	-	Santos <i>et al.</i> , 2015
	31,39 ± 4,3	41,15 ± 1,03	Moraes <i>et al.</i> , 2018
	42,63 ± 2,61	57,83 ± 3,72	Conceição, 2021

Fonte: De autoria própria (2022).

Dessa forma, com a necessidade de produtos mais eficazes e com cadeira de rodas com características que atendam a todos, independente de classe social, tem-se pensado na utilização desse compósito na estrutura da CRM, para reduzir o peso, facilitar a locomoção e acessibilidade do cadeirante.

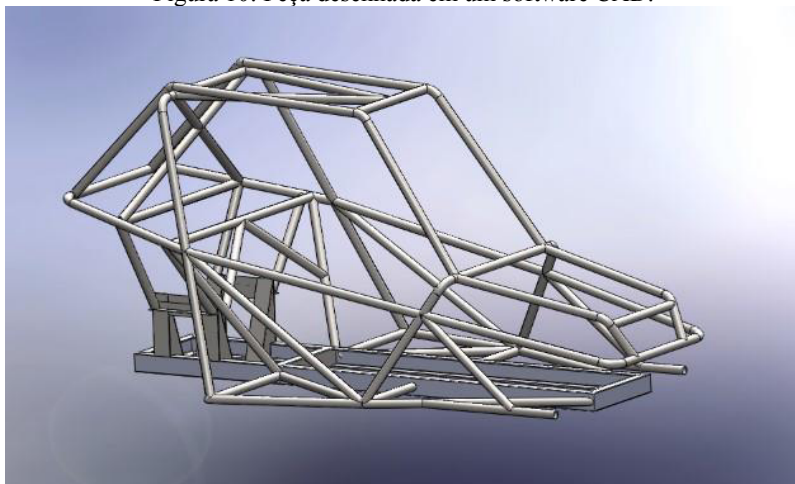
2.8 SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A simulação pelo Método de Elementos Finitos tem sido muito utilizada atualmente. Tem-se em vista uma melhor análise dos problemas da engenharia, reduzindo custos e tornando o processo mais eficiente e eficaz. Algumas das aplicações vão desde a análise de tensão e deformação em estruturas de aeronaves, automotivas, em pontes e em prédios até a análise de infiltração, transferência de calor, fluxo magnético, escoamento de fluidos, e outros problemas de fluxo (ALMEIDA, 2017).

Os avanços na tecnologia de computação e sistemas CAD (Computer Aided Design) têm ocasionado a diminuição dos problemas complexos, pois podem ser modelados com relativa facilidade. Assim, por meio de várias configurações alternativas realizam-se testes em um computador antes que o primeiro protótipo seja construído (LOGAN, 2012; ALMEIDA, 2017).

Neste cenário é necessária a pré-existência de um modelo a ser utilizado em uma simulação exigindo-se que a peça seja desenhada em formato CAD (Figura 10).

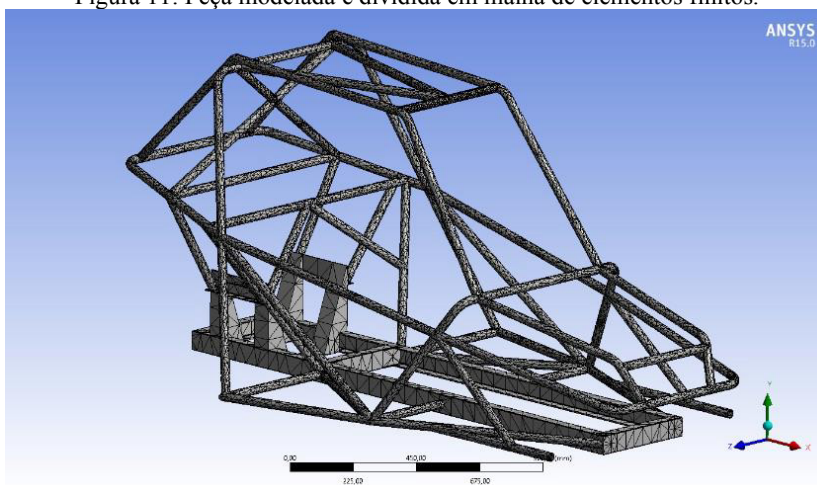
Figura 10: Peça desenhada em um software CAD.



Fonte: Pereira (2016).

Na Figura 11 nota-se como a imagem em formato CAD apresentada na Figura 10 será vista por meio de elementos finitos, onde irá ocorrer a divisão da peça em elementos infinitesimais. Esses elementos são unidos através de nós e em diversos formatos como triangulares e em formas de quadriláteros, ou até mesmo tetraedros, identificados nos softwares como malha (RAO, 2005 apud MARQUES, 2019).

Figura 11: Peça modelada e dividida em malha de elementos finitos.



Fonte: Pereira (2016).

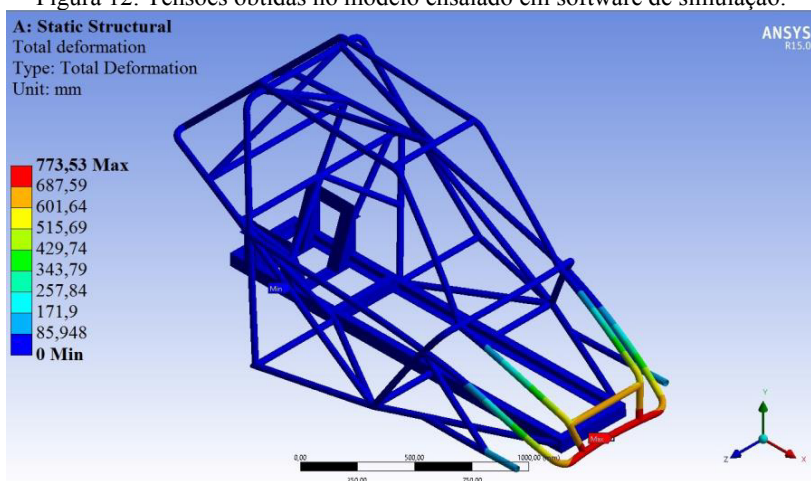
O método de elementos finitos apresenta também uma flexibilidade quanto as formulações possíveis do modelo, no qual as equações de entrada que definem a simulação podem ser de ordem linear ou quadrática, a depender de qual é o objetivo principal da simulação. Assim, equações lineares exigem menor processamento; já as equações quadráticas são mais precisas e não apresentam certos problemas presentes na formulação linear, como os fenômenos de “shear locking” (fenômeno em que elementos apresentam demasiada tensão de cisalhamento sob carregamentos diversos) e “hourglassing” (deformações excessivas, ou seja, distorção

excessiva da malha), que em algumas circunstâncias afetam substancialmente o resultado final (SUN, 2006).

Diversas observações podem abranger a análise da malha como: onde é necessário um refinamento de malha, ou seja, necessidade de elementos mais precisos; como serão distribuídos os carregamentos sobre o material; em que lugares podem acontecer maiores requisições de tensões, entre outros.

Então, além da análise da malha, têm-se vários outros tipos de recomendações que podem ser feitas quanto à análise, isso podendo ser uma análise estática, dinâmica ou estática e dinâmica ao mesmo tempo; ou se é uma análise de linearidade de deslocamentos ou mesmo estrutural. Na Figura 12 é apresentado, depois de sucessivas análises preliminares, o que deve ocorrer na simulação para obter o resultado que é desejado.

Figura 12: Tensões obtidas no modelo ensaiado em software de simulação.



Fonte: Pereira (2016).

Foram consideradas sobre esses elementos e expressas em termos de valores desconhecidos em pontos específicos dos elementos as propriedades dos materiais e as relações governantes. Considerando o carregamento e os vínculos, é feito um processo de montagem, que resulta em um conjunto de equações, no qual o comportamento aproximado do meio contínuo dá a solução dessas equações (DE LAS CASAS, 2013; ALMEIDA, 2017).

Segundo Almeida (2017), a análise de elementos finitos envolve três estágios de atividade:

- Pré-processamento - abrange a preparação de dados, como coordenadas nodais, conectividade, condições de contorno e informações de carregamento e material.
- Processamento - inclui geração de rigidez, modificação da rigidez e solução das equações,

resultando na avaliação das variáveis nodais.

- Pós-processamento - trata da apresentação dos resultados, normalmente, a configuração deformada, formas nodais, temperatura e distribuição de tensão são calculadas e exibidas nesse estágio (CHANDRUPATLA e BELEGUNDU, 2014).

2.9 TENSÃO DE VON MISES

A tensão de von Mises é usada como um critério para determinar o início de uma falha em materiais dúcteis (ALMEIDA, 2017).

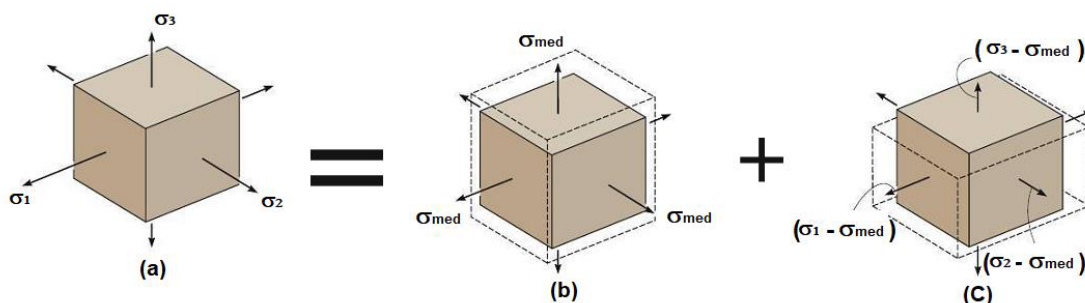
Entende-se que o material inicia o seu escoamento quando a tensão de Von Mises atinge o valor crítico conhecido como limite de resistência ao escoamento. Assim, a tensão de von Mises é utilizada para antever as deformações plásticas dos materiais sob quaisquer condições de carregamento multiaxiais, condensados em uma tensão equivalente à uniaxial (PETRACCONI, 2009).

Dessa forma, um material, quando submetido a um carregamento, se deforma e armazena energia internamente (MARQUES, 2019). Assim, essa energia por unidade de volume do material é definida como a densidade de energia da deformação e , se submetida a um estresse uniaxial, σ , essa densidade é descrita por meio da equação 2.1 (HIBBELER, 2010; MACHADO, 2013; apud MARQUES, 2019).

$$\mu = \frac{\sigma \varepsilon}{2} \quad (2.1)$$

Utilizando as tensões principais para o estado triplo de tensão (Figura 13), a densidade de energia de deformação μ é escrita por intermédio da equação 2.2.

Figura 13: Estado de tensão tri-axial.



Fonte: Hibbeler (2014).

$$\mu = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (2.2)$$

Em que ε_1 , ε_2 e ε_3 são as deformações presentes no elemento.

Aplicando a lei de Hooke generalizada, a energia de deformação total assume a forma da equação 2.3:

$$\mu = \frac{1}{2} [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (2.3)$$

Em que E corresponde ao módulo de elasticidade e ν ao coeficiente de Poisson.

Segundo Marques (2019) tem-se a seguinte definição para densidade de energia de deformação:

A densidade de energia de deformação pode ser considerada como a soma de duas partes, uma parte representando a energia necessária para causar uma alteração volumétrica do elemento sem alteração de forma e a outra parte representando a energia necessária para distorcer o elemento.

Especificamente, a energia armazenada internamente no elemento como resultado da alteração do volume é causado por aplicação da tensão média principal σ_{med} proporcional à equação 2.4, causando tensões principais iguais no material conforme a Figura 13 (b) (HIBBELER, 2014 apud MARQUES, 2019).

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.4)$$

Já a parte restante das tensões representadas na Figura 13 (c), ocasionam a energia de distorção. Assim tem-se a densidade de energia de distorção da equação 2.5 (SILVA FILHO, 2017; MARQUES, 2019).

$$\mu_d = \frac{1+\nu}{6E} \quad (2.5)$$

Em que, μ_d é a densidade de deformação após a energia de distorção, onde:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \rightarrow \text{tensões principais no ponto considerado.}$$

No caso do estado plano de tensões, tem-se que $\sigma_3 = 0$, e a equação 2.5 se reduz a equação 2.6 (SILVA FILHO, 2017; MARQUES, 2019).

$$\mu_d = \frac{1+\nu}{3E} \quad (2.6)$$

Já em um estado uniaxial, $\sigma_1 = \sigma_e$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, substituindo na equação 2.5 se reduz para a equação 2.7 (SILVA FILHO, 2017; MARQUES, 2019):

$$(\mu_d)_e = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_e^2 \quad (2.7)$$

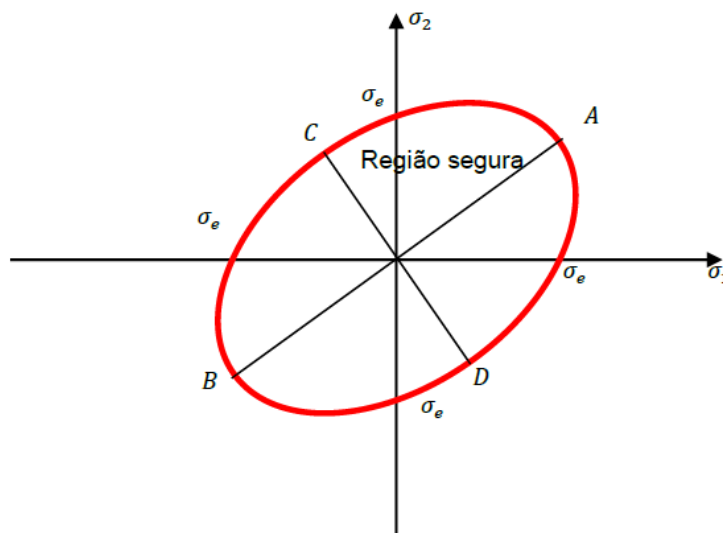
Segundo Cunha (2014), para von Mises a segurança está garantida até o ponto no qual a energia de distorção (μ_d) se iguala ou supera a energia de distorção necessária para provocar o escoamento do corpo de prova no ensaio de tração μ_{de} (constante para dado material e condições e independente do estado de tensões), ou seja, a segurança está garantida enquanto o ponto estiver interno à área da Figura 14. Assim, se um determinado ponto do material estiver

tracionado de tal maneira que as coordenadas das tensões σ_1 e σ_2 sejam plotadas no limite ou fora do círculo vermelho, conforme equações 2.8 e 2.9, diz-se que o material falhou (MARQUES, 2019).

$$\frac{1+\nu}{6E} \quad (2.8)$$

$$\text{Segurança } \mu_d \leq (\mu | |d)_e \quad (2.9)$$

Figura 14: Critério de von Mises.



Fonte: Cunha (2014).

2.10 DEFORMAÇÃO POR DEFLEXÃO

Toda e qualquer flexão que seja aplicada ao material resultará em uma deflexão na estrutura. Porém, uma vez que a deflexão não cause deformações que ultrapassem o ponto de escoamento do material, a estrutura será capaz de regressar ao seu estado normal, assim que tiver a carga removida (deformação elástica) (LISBOA *et al.*, 2018). Dependendo da fragilidade do material, o mesmo poderá sofrer uma deformação permanente ou até mesmo fraturar, caso essa deformação exceda o ponto de escoamento (deformação plástica) (NORTON, 2013).

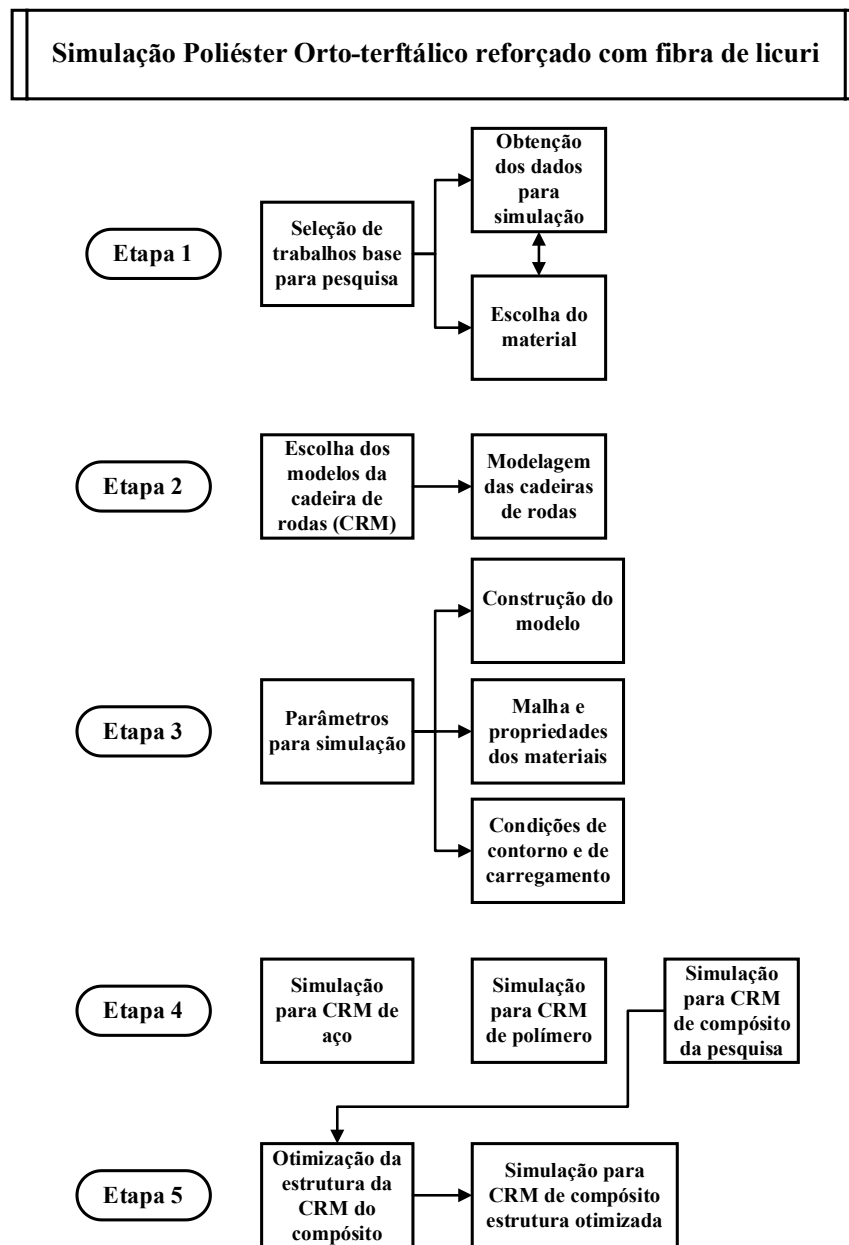
Assim, a deflexão é a deformação que um elemento registra a partir da aplicação de uma força, pois a mesma é gerada por flexão interna. Mas a deflexão também é conhecida como deslocamento e pode ocorrer a partir de cargas aplicadas externamente ou do peso da própria estrutura, e a força da gravidade a que isso se aplica.

O cálculo da deflexão é possível de acordo com as leis que ligam as forças e os

deslocamentos através de um método geométrico ou de energia. A deflexão é uma resposta estrutural perante as aplicações de cargas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma representa as etapas que foram realizadas neste tópico, com o objetivo de apresentar de forma resumida toda metodologia desenvolvida.



Fonte: De autoria própria, 2022.

3.1 POLIÉSTER ORTO-TEREFTÁLICO REFORÇADO COM FIBRA DE LICURI (PORFL)

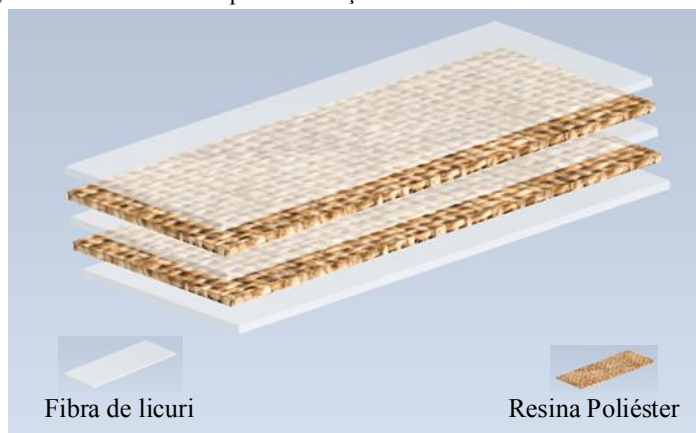
Neste trabalho foi escolhido o seguinte material: compósito polimérico a base de fibra de natural, o qual teria como matriz a resina poliéster orto-tereftálica (Novopal L-120) e o reforço à

fibra de licuri. Assim, partiu-se para a realização de simulação via software Abaqus por meio de elementos finitos para demonstrar os esforços gerados por um determinado carregamento sobre a estrutura de uma cadeira de rodas, aplicando a norma ABNT NBR ISO 7176 (ABNT Coleção, 2023) para realizar a análise numérica da CRM.

Com o objetivo de levantar e validar dados essenciais para a pesquisa, alguns trabalhos foram utilizados como base para fundamentar a simulação, tais como: Thomas (2011), Leão (2013), Moraes (2018) e Conceição (2021) com o fim de fornecer os parâmetros de entrada e observar o comportamento deste compósito referente a esforços feitos via simulação (*software Abaqus*) para verificar a possibilidade da utilização em fabricação de cadeiras de rodas. Através destes estudos foi possível levantar os resultados de propriedades mecânicas obtidos para os polímeros reforçados com fibras naturais (licuri), para dar maior visibilidade a esse material. Assim, valores de limite de resistência mecânica e módulo de elasticidade foram considerados e utilizou-se os resultados dos quatro trabalhos indicados para calcular a média, os quais serão utilizados nas simulações.

Por meio da leitura e dos trabalhos de Thomas (2011), Leão (2013), Moraes (2018) e Conceição (2021), que serviram de base para este estudo e pesquisa, conseguiu-se ter informações importante para nortear as simulações. Onde o material compósito em estudo possui formas estruturais de laminados com duas camadas de tecido unidirecional de licuri, com dimensões de aproximadamente 40cm de largura e 50cm de comprimento. O processo de fabricação utilizado foi laminação manual (*hand lay-up*). A resina de poliéster orto-tereftálica Novapol L120 aplicadas para impregnar os tecidos, sem o uso adicional de estireno. E o metil-etil-cetona (MEKP) seria usado como agente catalisador (cura a temperatura ambiente). Na Figura 15 é apresentado um esquema representativo da obtenção do compósito e como, possivelmente, distribuiriam-se as camadas de resina e tecido.

Figura 15: Laminado compósito reforçado com tecido unidirecional de licuri.



Na Tabela 4 encontram-se dispostos dados sobre a resina objeto de estudo, Novopal L120. Essas informações foram consultadas em um Boletim Técnico da empresa Novopal (POLGLASS, 2022) e serão utilizadas para simular o polímero, bem como ajudaram na comparação entre os materiais (aço e compósito), além de condicionar na escolha do modelo da cadeira para utilização na simulação para o compósito.

Tabela 4: Propriedades Mecânicas da resina Novopal L-120.

PROPRIEDADE	MÉTODO	UNIDADE	VALOR
Tensão			
Resistência à tração	ASTM D638	MPa	53
Módulo à tração	ASTM D638	GPa	2.9
Deformação à tração	ASTM D638	%	5.0
Flexão			
Resistência à flexão	ASTM D790	MPa	94
Módulo à flexão	ASTM D790	GPa	3.2
Deformação à flexão	ASTM D790	%	1.5
Outras propriedades			
Contração volumétrica		%	3.0
HDT	ASTM D648	°C	70
Dureza	ASTM D2583	Barcol	42

Obs.: Ciclo de curado: 24 horas a 25°C, 3 horas a 80°C.

Fonte: Adaptado de Polglass (2022).

Os dados representados na Tabela 5 são relativos aos valores utilizados para subsidiar as simulações, os quais decorreram da pesquisa realizada nos trabalhos que serviram para fundamentar este estudo. Por meio desses valores, chegou-se a um valor médio que está representado na Tabela 5, o qual foi utilizado como informação de entrada no *software* de simulação.

Tabela 5: Valores dos ensaios de tração obtidos nos trabalhos pesquisados e valor médio.

AUTOR	Tensão limite de escoamento (MPa)	Desvio Padrão (\pm)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (\pm)
Mirtânia (2013)	41,9	2,51	1,96	0,29
Conceição (2021)	42,63	2,61	2,74	0,17
Thomas (2011)	54	11,6	3,6	0,6
Thomas (2011)	59,2	7,76	4,7	0,6
Moraes (2018)	31,39	4,3	0,95	0,1
Média	45,82	5,76	2,79	0,35

Fonte: De autoria própria, 2022.

3.2 ESCOLHA DOS MODELOS DAS CADEIRAS DE RODAS

A finalidade de utilizar os três modelos de cadeiras foi para observar como cada um deles se comportaria diante das simulações, verificando-se qual obteria melhores resposta ao aplicar determinada carga. Ao final, o objetivo é escolher um modelo para ser aplicado para o material da pesquisa, uma vez que o PORFL apresenta valores de propriedades mecânicas inferiores aos materiais metálicos descritos na Tabela 5.

Foram escolhidos três modelos de cadeiras de rodas para realizar as simulações, desde de modelos mais simples como mais sofisticados, com o objetivo de analisar como se comportarão suas respectivas estruturas físicas a partir do estímulo mecânico aplicado, tendo como base a simulação por elementos finitos. Posteriormente a essa primeira análise, para realizar a avaliação da aplicação do compósito na fabricação da CRM, foi feita a escolha do modelo que apresentou uma maior tensão a ser desenvolvida em sua estrutura como resultado da etapa inicial da simulação e outro fator importante seria um modelo mais utilizado pelos portadores deste equipamento. Na Figura 16 (a), (b) e (c), são apresentadas imagens realísticas para criação dos modelos das cadeiras de rodas (CRM) utilizadas nas simulações.

Figura 16: Cadeiras de Rodas referências para elaboração de modelos em CAD.



Fonte: (a) Ortiline, 2022, (b) Dellamed, 2022 e (c) Ortopedia Jaguaribe, 2022.

O modelo (a), da Figura 16, tem as seguintes características: Fabricada em tubos de aço carbono com encosto e assento (duplo) em nylon, encosto com tubo 7/8; dobrável em "X", freios com manopla bilaterais dianteiro com regulagem; aro impulsor bilateral em nylon injetado; apoio fixo para os braços, com apoio em nylon injetado; apoio fixo para os pés, com barra de reforço, com pedal em nylon injetado rebatível lateralmente; rodas dianteiras aro 6" com pneus maciços; rodas traseiras aro 24" em nylon injetado, com pneus maciços (PL 001) e rolamento duplo blindado; garfos em aço carbono achatado e maciço; pintura epóxi (eletrostática). Capacidade de peso até 90kg.

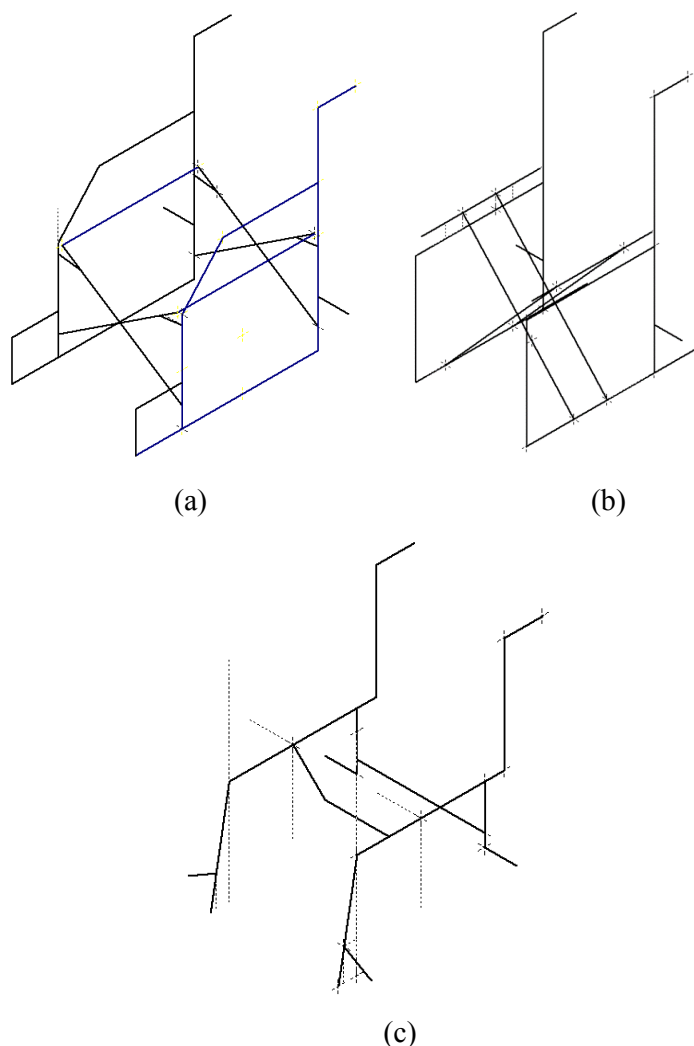
O modelo (b), da Figura 16, tem as seguintes características: Fabricada em estrutura de alumínio aeronáutico, contando com o sistema em duplo X dobrável, protetor lateral de roupas e rodas com pneus maciços de fácil remoção através de botão quick release; rodas traseiras de 24" com pneus infláveis, raios em inox reforçados e aro de propulsão de alumínio; conta com freios bilaterais reguláveis e ergonômicos, apoio de braços escamoteáveis e assento acolchoado. Capacidade de peso até 120kg.

O modelo (c), da Figura 16, tem as seguintes características: Fabricada em aço, estrutura monobloco; pintura eletrostática epóxi; rodas traseiras de 24" em alumínio, raiadas com pneus anti furo; rodas dianteiras de 5", com pneus maciços e garfos de alumínio; rodas anti tombo, freios bilaterais reguláveis e apoio de pés ajustável em altura. Capacidade para 100kg.

3.3 MODELAGEM DAS CADEIRAS DE RODAS NO SOFTWARE INVENTOR

Antes de realizar a simulação é necessário ter o desenho em 3D das cadeiras de rodas em formato CAD. A partir das dimensões originais de cada uma das cadeiras de rodas, utilizou-se o software Inventor (licença gratuita para professores) a fim de desenvolver cada modelo para simular através do método de elementos finitos. Com isso, foi possível chegar aos seguintes desenhos representados na Figura 17 (a), (b) e (c).

Figura 17: Estrutura das Cadeiras de rodas em formato CAD para simulação.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Para chegar a cada um dos modelos apresentados na Figura 16, utilizou-se os dados apresentados na Tabela 6, informações que foram obtidas nas descrições de imagens encontradas na internet (em sites de fabricantes). Sendo os diâmetros e espessuras escolhidos devido ao tipo de material utilizado na pesquisa.

Tabela 6: Informações utilizadas para modelar as cadeiras de rodas no software CAD.

Cadeira de rodas	Diâmetro tubos	Espessura dos tubos (mm)	Largura do assento (mm)	Profundidade e do assento (mm)	Altura do encosto (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
Modelo (a)	1"	3mm	40	44	36	71	68
Modelo (b)	2"	3mm	40	46	47	58	86,5
Modelo (c)	2"	3mm	40	46	36	63,8	69

Fonte: De autoria própria, 2022.

Os desenhos prontos foram enviados para o programa Abaqus (programa licenciado da

Universidade Federal de Sergipe - UFS) que utiliza o princípio de elementos finitos para realizar as simulações.

3.4 PARÂMETROS PARA SIMULAÇÕES

Antes de iniciar as simulações no *software* Abaqus deve-se escolher os parâmetros para realizá-las, os quais seguem os passos que irão ser detalhados nos itens 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3.

3.4.1 Construção do modelo

Primeiro ocorre a construção dos modelos que vão ser derivados dos desenhos feitos no Inventor, para assim, com esses modelos do software CAD serem importados para o software Abaqus, projetando as estruturas com formato real para realizar as simulações.

Nesta pesquisa utilizou-se como base o trabalho de Cota (2011), que realizou a simulação por meio de elementos finitos em uma cadeira de rodas. Cabe ressaltar que o trabalho citado realizou simulação em três componentes que foram divididos da seguinte forma: lateral (a), haste (b) e tesoura (c), como mostrado na Figura 18. Já a Figura 19 mostra a cadeira montada.

Figura 18: Componentes estruturais da cadeira de rodas. a) Lateral; b) Haste; c) Tesoura.

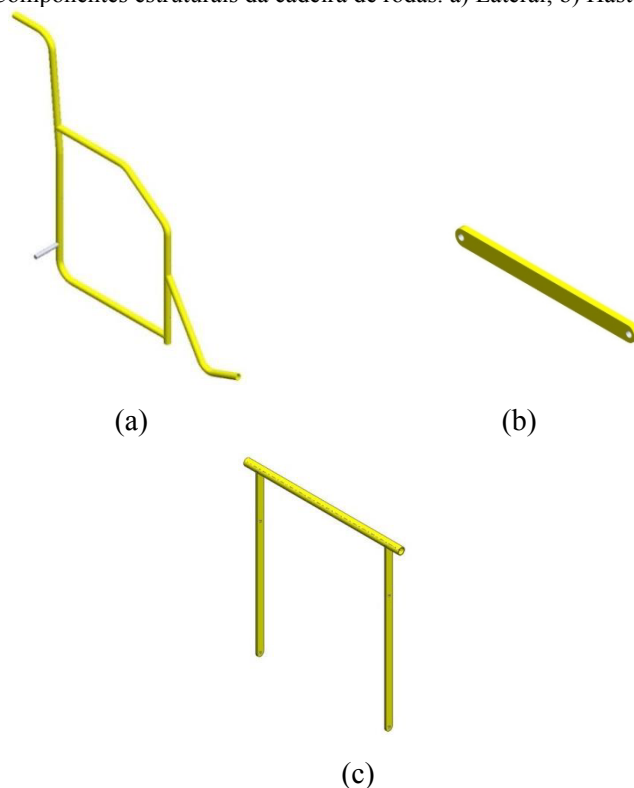
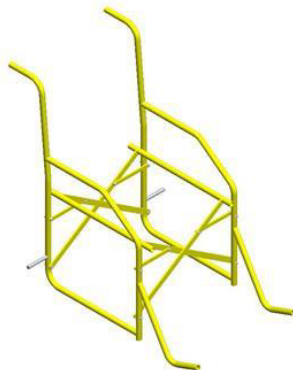


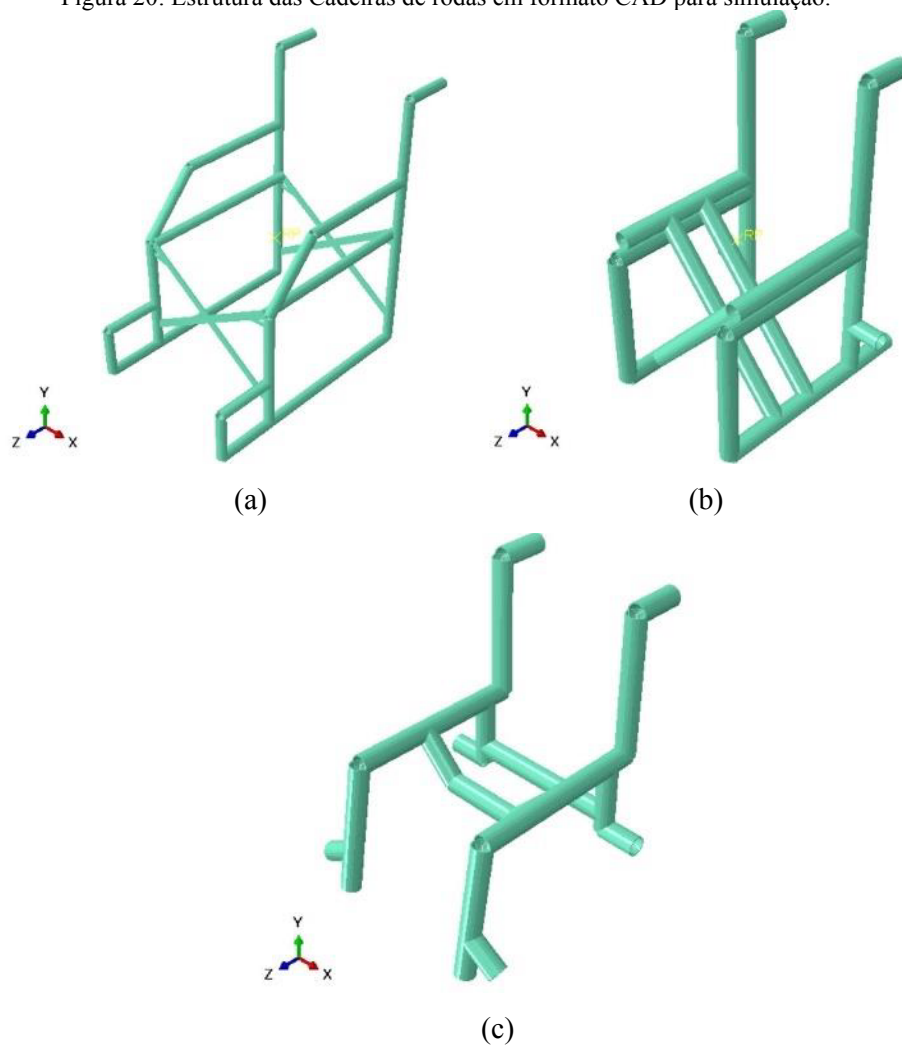
Figura 19: Montagem da estrutura.



Fonte: Cota (2011).

Nesta pesquisa aqui apresentada, utilizou-se a estrutura completa da cadeira de rodas, sendo que foram utilizados três modelos diferentes. Pra cada cadeira foi escolhido o formato de sua estrutura, de acordo com a cadeira real, como se vê na Figura 20.

Figura 20: Estrutura das Cadeiras de rodas em formato CAD para simulação.



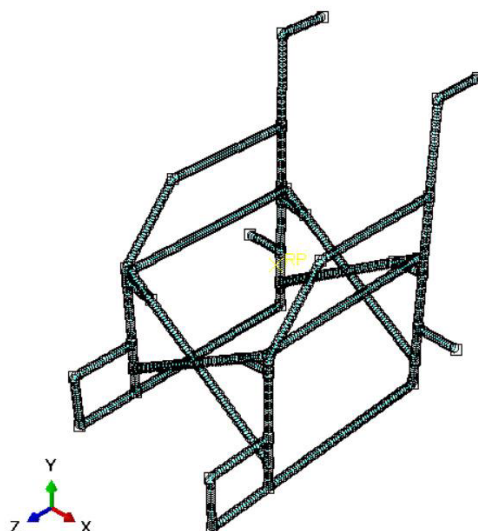
Fonte: De autoria própria, 2022.

Dessa maneira, a estrutura será em formato tubular, sendo que o modelo (a) possui os tubos com 1'' de diâmetro (que na estrutura real era de 7/8'') enquanto os modelos (b) e (c) possuem 2'', e a espessura dos tubos utilizados para os três modelos foi de 3mm. Devido aos materiais envolvidos, no caso do polímero e do compósito, foi escolhido essa espessura, sendo que a espessura mínima que pode ser utilizada é de 1,5mm.

3.4.2 Malha e propriedades dos materiais

Depois da construção do modelo apresentado na Figura 20, utiliza-se as estruturas das CRM para aplicar o método de representação de nós, o qual dividirá a CRM em várias partes infinitesimais, que formam a malha destas. A malha desenvolvida para a estrutura está representada na Figura 21. As propriedades intrínsecas aos materiais, além dos tipos de malha e de elemento estão apresentadas na Tabela 7.

Figura 21: Representação da malha da estrutura da cadeira de rodas.



Fonte: De autoria própria.

Tabela 7: Tipo de Malha e propriedades de cada material utilizados nas simulações das cadeiras de rodas.

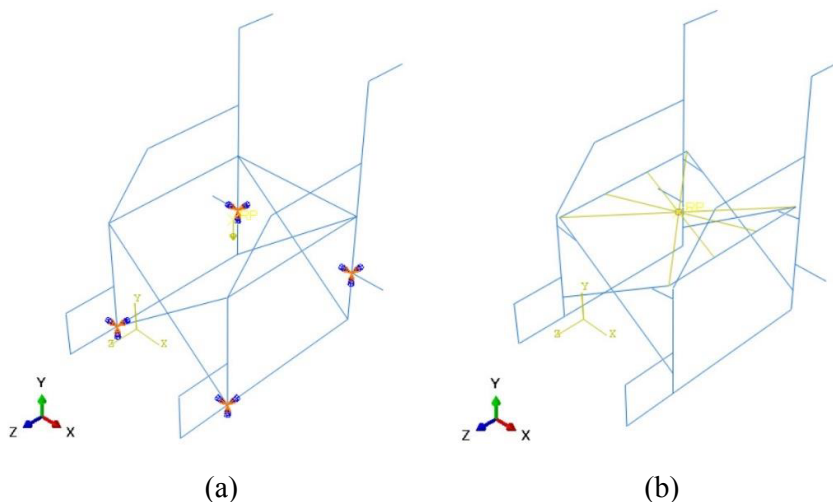
	Material	Tipo de Elemento	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
Cadeira de rodas	Aço (ASTM A36)	A2	207	0,33
	Polímero (Poliéster)	A2	2,9	0,37
	Compósito (PORFL)	A2	2,79	0,25

Fonte: De autoria própria, 2022.

3.4.3 Condições de contorno e de carregamento

Na etapa seguinte, decidiu-se sobre quais são as condições de contorno e o carregamento, sendo aplicado o engaste (apoio estrutural) nas regiões onde se encontram as rodas da CRM, tanto dianteira como traseira (Figura 22 (a)) para fazer a análise estática. A condição de carregamento é também observada na Figura 22 (b), onde o mesmo é aplicado no centro da cadeira de rodas com o intuito de simular o peso de uma pessoa, assim interligando as duas barras das laterais que fazem parte do assento da CRM e distribuindo sobre toda região deste.

Figura 22: Condições de contorno: engaste na base da estrutura e carga aplicada na cadeira de rodas.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Foi imposta à estrutura uma condição limite, de maneira que é aplicada uma carga estimada, a qual foi baseada na massa de uma pessoa que varia entre 90 a 120kg referentes aos modelos das CRM escolhidas, ou seja, 882 a 1176N (considerando força gravitacional de $9,8\text{m/s}^2$), um valor que abrange o peso dos possíveis usuários, incluindo ainda um fator de segurança de aproximadamente 2,1 (segurança de projeto), superior aos valores usuais utilizados em projetos mecânicos, variando de 1,3 a 2,0 (MOHAMMADI, 2010 apud COTA, 2011), conduzindo a um carregamento de projeto de intensidade 2450 N.

3.5 REALIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

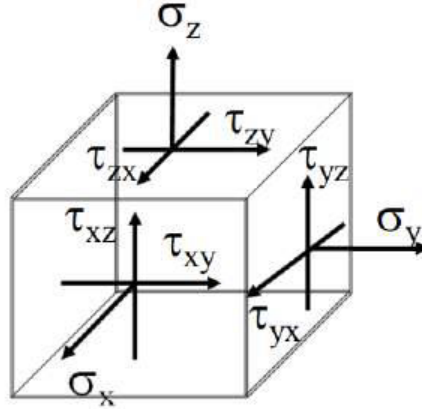
Após as escolhas de todos os parâmetros que foram detalhados no item anterior, decidiu-se partir para a organização das ordens das simulações.

Mas, para melhor compreender como o software faz a leitura das informações e obtém os resultados, utiliza-se esse modelo matemático da mecânica dos sólidos, em especial na parte estática, que é o de elasticidade 3D sobre cada peça da geometria. O objetivo é aplicar um

problema de contorno em cada peça e considerar o contato entre as partes.

Dessa forma, as equações governantes da Elasticidade 3D são resolvidas no programa de elementos finitos. Inicialmente, considera-se um elemento infinitesimal (Figura 23) em equilíbrio obtém-se as Equações 3.1 para as três direções. Desprezando forças externas influenciando no modelo, podem ser destacados que f_x , f_y e f_z são iguais a zero.

Figura 23: Elemento Infinitesimal.



Fonte: Bhaskaran, 2018.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z &= 0 \end{aligned} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Segundo Costa (2014), partindo das três equações (Eq. 3.1), as quais possuem 6 incógnitas (três tensões normais e três tensões cisalhantes), e utilizando as propriedades dos materiais dadas pela Lei de Hooke em 3D dada na Equação 3.2, relacionam as tensões com as deformações partindo de valores de módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν) constantes.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Dessa forma, inclui-se ainda, as relações de tensão-deflexão apresentadas na Equação 3.3.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
 \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\
 \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\
 \tau_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\
 \tau_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\
 \tau_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}
 \end{aligned}
 \tag{Eq. (3.3)}$$

Sendo que ε_x , ε_y , ε_z , γ_{xy} , γ_{xz} e γ_{yz} são as deformações e u , v e w os deslocamentos.

Então a partir desse modelo matemático que foi representado nas equações 3.1, 3.2 e 3.3, é que o software adquire os valores para as tensões de Von Mises e deformação por deflexão.

Para iniciar as simulações, fez-se necessário fornecer ao programa duas informações importantes para análise de cada material. Estas informações são o Módulo de Young (ou Módulo de Elasticidade) e o coeficiente de Poisson, como mostrado no modelo matemático.

Com tudo já planejado, iniciou-se a análise para o aço, depois para o polímero (sendo que para ambos foi realizada para os três modelos de cadeira de rodas). O objetivo é analisar como cada estrutura reage ao carregamento equivalente a 2450N e, por fim, definir qual modelo de estrutura é mais adequado para simulação com o compósito polimérico PORFL.

3.5.1 Simulações para o aço (ASTM A36)

Na simulação para o aço ASTM A36 utilizou-se os três modelos de cadeiras, iniciando com os parâmetros que foram estabelecidos no item 3.4, e em seguida entrando com os dados do Módulo de Young de 207GPa e o Coeficiente de Poisson de 0,33 (por ser um material isotrópico). Esses dados são importantes para saber como cada modelo de CRM irá se comportar frente ao carregamento por uma determinada área (Von Mises) e também avaliar o comportamento em deformação por deflexão da estrutura diante da força aplicada. O aço ASTM A36 (Tabela 8) foi escolhido por possuir boas propriedades mecânicas e soldabilidade, além de ser indicado pelo fabricante e ter sido aplicado em diversos outros trabalhos sobre o tema (BRAIDOT e ALEMAN, 2011; ISMAIL, 2012; OBANDO-HERRERA et al., 2017; apud MARQUES, 2019).

Tabela 8: Propriedades do Aço ASTM A36.

Módulo de Elasticidade (GPA)	Coefficiente de Poisson	Limite de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)
207	0,33	250	400

Fonte: Adaptado de Avutu (2019 apud Marques, 2019).

3.5.2 Simulações para o polímero (Novapol L120)

Para o polímero também utilizou-se os três modelos de cadeiras, os quais seguiram as mesmas etapas que o aço, diferenciando os dados de entrada no software, que foram: Módulo de Young de 2,9GPa e Coeficiente de Poisson de 0,37 (PIERIN, 2005, p. 20). Sendo que o polímero possui uma resistência à tração de 53MPa.

3.5.3 Simulação para o PORFL

Para o compósito polimérico, utilizou-se apenas um modelo de cadeira de rodas, sendo o modelo (a), entrando com os dados do Módulo de Young de 2,79GPa e Coeficiente de Poisson de 0,25 (OLIVEIRA, 2015, p. 78; GUIMARÃES, 2018, p. 63). Sendo que o polímero possui uma resistência à tração de 45,82MPa.

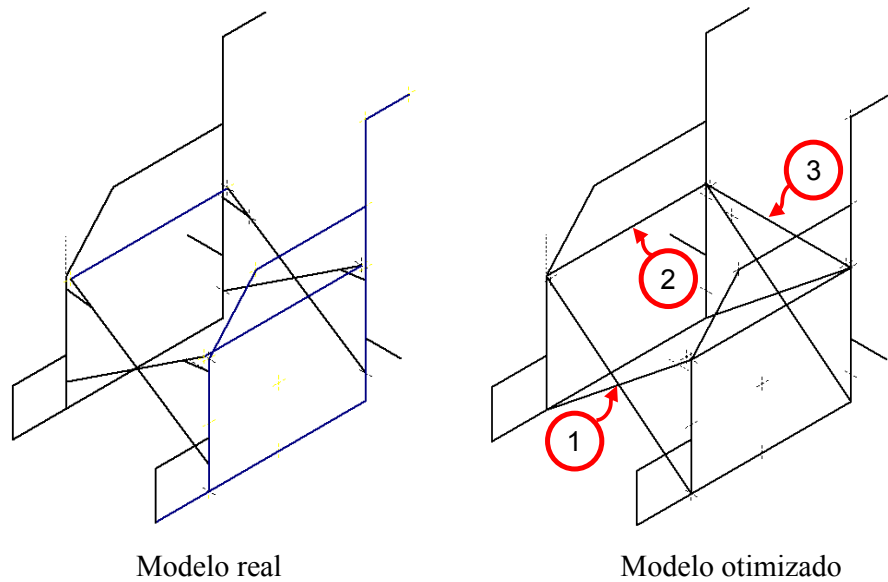
3.6 OTIMIZAÇÃO DO MODELO (a) DA CADEIRA DE RODA

Nessa etapa, ao analisar o resultado da tensão de Von Mises obtida para a CRM de PORFL que foi de 104,86MPa, e sabendo que o valor da resistência à tração para o compósito foi de 45,82MPa, chegou a conclusão que a CRM não suportaria ao carregamento. Dessa forma foi necessário a otimização do projeto da estrutura desta CRM, com o intuito de melhorá-la para suportar o carregamento que foi utilizado de 250kg (2450N).

Assim, foram feitas adaptações na estrutura da cadeira de rodas e foram realizadas simulações para melhorar possíveis problemas estruturais encontrados para suportar o carregamento. A Figura 24 mostra algumas diferenças do modelo real para o modelo otimizado (desenho no Inventor), que foram três mudanças: 1- os tubos em formato de X (dianteiro e traseiro) foram colocados e fixados no início e no final dos tubos laterais que estão na vertical, deixando estes fixos; 2- os tubos laterais que ficam na posição horizontal passaram a ser fixos na

estrutura e não possuem nenhum grau de liberdade para movimentar-se em nenhuma direção; e 3- foi feita a adição de mais um tubo na região traseira da cadeira para melhorar a rigidez do sistema, distribuir melhor o carregamento aplicado e consequentemente aprimorar a resistência da estrutura da cadeira.

Figura 24: Indicação da diferença entre modelo real e modelo otimizado da cadeira de roda.



Fonte: De autoria própria, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados das simulações para verificação da aplicabilidade do compósito polimérico reforçado com fibra de licuri em cadeiras de rodas manuais. O primeiro passo foi dado ao aplicar a simulação em um material que vem sendo utilizado nas estruturas desses equipamentos, neste caso, o aço (ASTM A36). Posteriormente, foram realizadas outras simulações considerando a utilização do polímero, sendo que para esses dois materiais foram aplicadas em três modelos distintos, como relatado na metodologia. E por fim, foi escolhido um modelo entre os três para aplicar a simulação do PORFL.

Dois fatores importantes para a análise dos resultados das simulações foram analisados: a tensão de Von Mises, que é responsável por avaliar como o carregamento é distribuído por toda estrutura, mostrando como cada parte sofre a tensão em Mega Pascal (MPa); e a deformação por deflexão, que mostra o quanto cada parte da cadeira se deforma por meio da deflexão da estrutura, isso quantificado em milímetros (mm).

4.1 SIMULAÇÃO PARA O AÇO

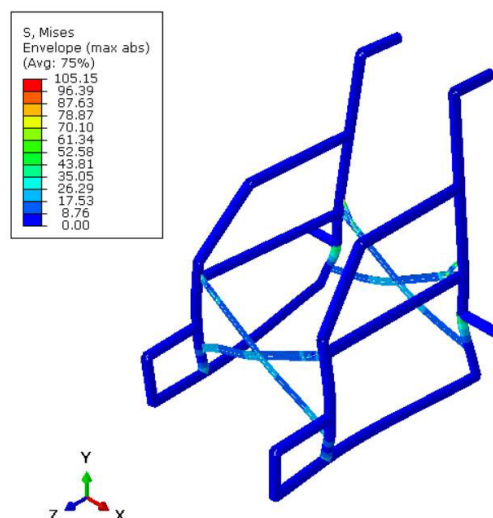
O aço ASTM A36 foi utilizado na simulação para a CRM com o fim de servir como parâmetro de comparação de seus resultados com os valores dos demais materiais (polímero e compósito), pois se faz necessária a comparação dos resultados tomando-se como referência um material que já tem sido aplicado na fabricação deste equipamento.

Algumas informações que vão ser importante para análise são os valores dos limites de escoamento e a resistência à tração do aço A36, que são 250 MPa e 400MPa, respectivamente.

A partir da simulação realizada obtiveram-se os resultados da tensão de Von Mises e da deformação por deflexão para os três modelos, como se verifica nas Figuras 25 a 30.

As Figuras 25 e 26 mostram os resultados referentes ao modelo (a) da cadeira de rodas. E como podem ser observados na Figura 25, tem-se a representação da simulação referente ao valor de distribuição de tensões pelo critério de Von Mises. Examinando o quadro ao lado, percebe-se que os valores que estão em destaque ficaram entre as colorações azul e verde, em sua maior parte, e são responsáveis pelos valores de 0 a 70,1MPa. Mas a tensão a ser desenvolvida apresentou um valor máximo de 105,15MPa, gerando um fator de segurança de 3. Esse fator de segurança, apesar de ser um valor alto, demonstra que ficou abaixo do limite de escoamento para o aço A36, que é de 250MPa. Assim apresentando valor esperado para a estrutura da CRM deste material, que resistirá ao carregamento de 2450N.

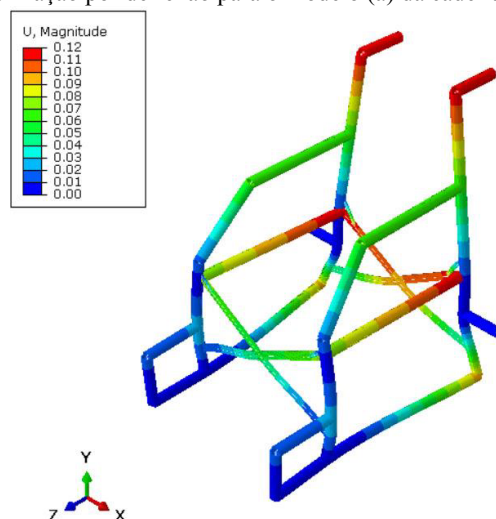
Figura 25: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (a) da cadeira de rodas de aço.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Na Figura 26, os valores da deformação por deflexão para a parte estrutural também ficaram dentro de projeções consideradas positivas. Obtendo resultados que ficaram próximos a zero.

Figura 26: Deformação por deflexão para o modelo (a) da cadeira de rodas de aço.

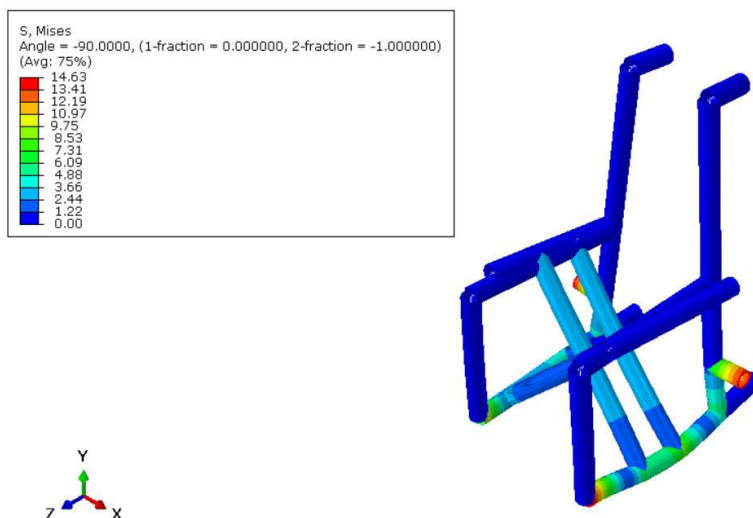


Fonte: De autoria própria, 2022.

Para o modelo (b) (Figuras 27 e 28) tem-se valores da tensão de Von Mises ainda melhores, pois apresenta uma estrutura bem mais robusta (diâmetro dos tubos 2'') em relação ao modelo anterior (diâmetro dos tubos 1''). E o valor de tensão a ser desenvolvida máximo é de 14,63MPa, ou seja, um valor 17 vezes menor que o limite de escoamento do aço A36 (250MPa). Dessa forma, a estrutura para esse modelo também resistiria ao carregamento. Sendo que as projeções apresentaram valores entre 0 a 9,75MPa (Figura 27) em sua maioria, que obtiveram a

cor azul, sendo observados alguns pontos amarelos e vermelhos sempre nas extremidades onde ficaram os apoios das CRM.

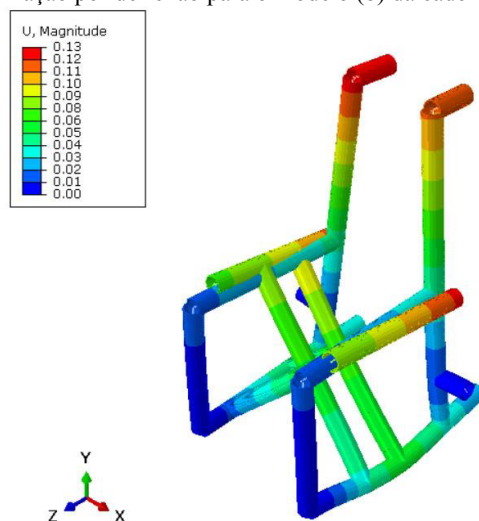
Figura 27: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (b) da cadeira de rodas de aço.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Em relação à Figura 28, tem-se a deformação por deflexão sofrida pelo modelo (b) com valores considerados pequenos (que ficaram dentro do limite de deformação elástica), pois em sua maioria está apresentando, em boa parte da estrutura, coloração azul e verde, sendo o alcance máximo de 0,13mm, ficando em sua maior parte entre 0 e 0,09mm.

Figura 28: Deformação por deflexão para o modelo (b) da cadeira de rodas de aço.

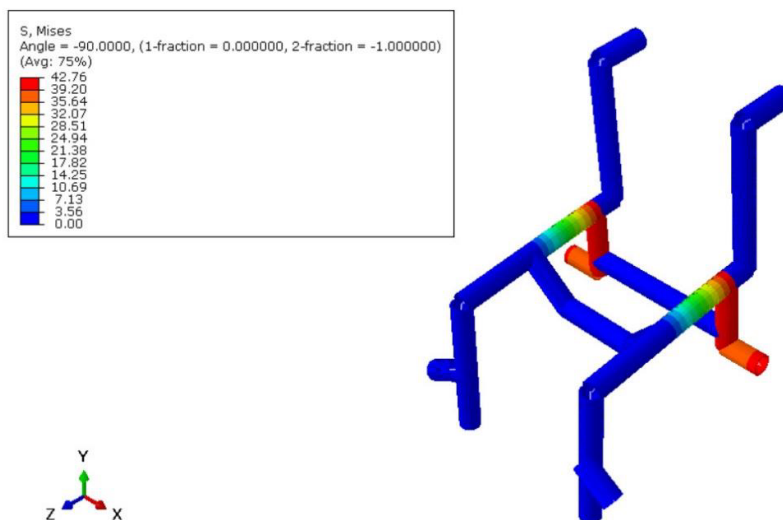


Fonte: De autoria própria, 2022.

Para o modelo (c) (Figura 29) é possível notar o predomínio da coloração azul (faixa de 0 a 7,13MPa) para as tensões de Von Mises. O valor máximo da tensão ficou por volta de

42,76MPa, ficando abaixo do limite de escoamento (250MPa), apesar de existir regiões nas cores alaranjada e vermelha localizadas próximo ao apoio das rodas. Com isso, mesmo atingindo esse valor máximo, a estrutura da CRM suportaria ao carregamento, tendo um fator de segurança de aproximadamente 6.

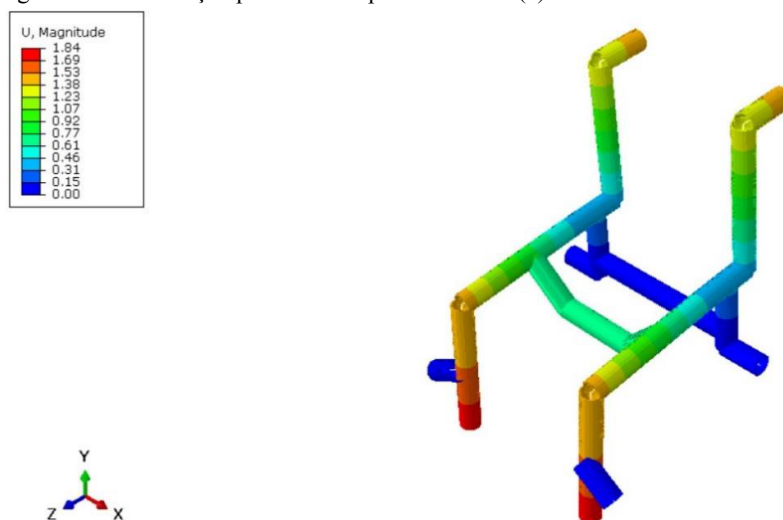
Figura 29: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (c) da cadeira de rodas de aço.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Já em relação ao valor da deformação por deflexão (Figura 30) que é exemplificado pela magnitude, apresenta resultados maiores que as CRM anteriores, em decorrência da sua estrutura ser mais simples e com menos tubos na região central, apresentando um maior deslocamento de 1,84mm.

Figura 30: Deformação por deflexão para o modelo (c) da cadeira de rodas de aço.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Na Tabela 9 encontram-se sistematizados os valores máximos que foram obtidos para os

três modelos de estrutura simulados, onde pode ser observado que o modelo (a) foi o que apresentou os mais altos valores em relação a tensão de Von Mises (tensão a ser desenvolvida na estrutura). O que isso significa? Que ele distribui a carga de 2450N por toda sua estrutura, obtendo um valor máximo que fica por volta de 105,15MPa, ou seja, seu fator de segurança comparada aos demais modelos é menor, ficando por volta de 3. Já o modelo (c) apresenta um maior deslocamento em sua estrutura, o qual é demonstrado pelo valor da magnitude que ficou em torno de 1,84 mm na região de apoio da roda dianteira, como foi apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Comparativo entre os valores de Von Mises e deformação por deflexão dos três modelos para o aço.

Cadeira de Rodas	Von Mises (MPa)	Deformação por Deflexão (mm)
Modelo (a)	105,15	0,12
Modelo (b)	14,63	0,13
Modelo (c)	42,76	1,84

Fonte: De autoria própria, 2022.

4.2 SIMULAÇÃO PARA O POLÍMERO

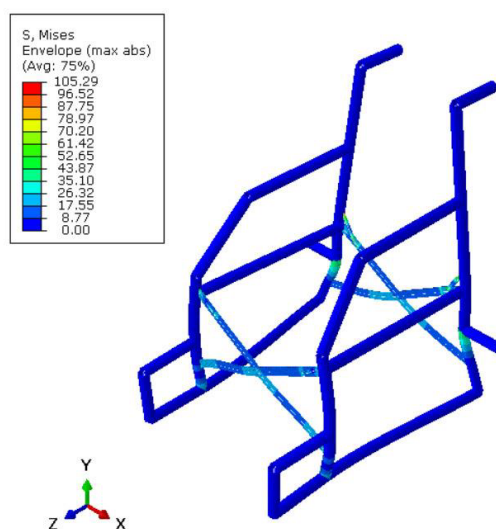
A simulação que foi realizada para o polímero seguiu as mesmas etapas aplicadas para o aço, a fim de observar como o poliéster orto-tereftálico (Novopal L-120) se comportaria diante do mesmo carregamento. Muitas perguntas podem surgir sobre a necessidade dessas simulações para este material. Mas existe uma diferença considerável entre os valores do Módulo de Young do aço para o polímero, sendo que o do primeiro é de **207GPa** e o do segundo **2,9GPa**, o que trará uma diferença nos resultados das simulações, pois logo percebe-se que será uma estrutura que apresentará valores de deformação maior.

Nas Figuras 31 a 36 estão apresentados os resultados das simulações com os valores obtidos para o polímero objeto da análise.

Nas Figuras 31, 32 e 33 por se tratar da mesma estrutura da CRM, os valores da tensão de Von Mises (depende somente da carga e da geometria) terão valores bem parecidos, pois a distribuição da carga na estrutura não foi alterada para esta simulação. Percebendo que para o modelo (a) (Figura 31) os valores obtidos para as tensões de Von Mises ficaram com valores entres 0 e 26,32MPa, e predomínio da coloração azul e tensão máxima desenvolvida de 105,29MPa. Sendo um valor bem maior que a resistência à tração deste material (53MPa) o que resultaria em ruptura desse material, ou seja, não suportaria ao carregamento de 2450N. Para o

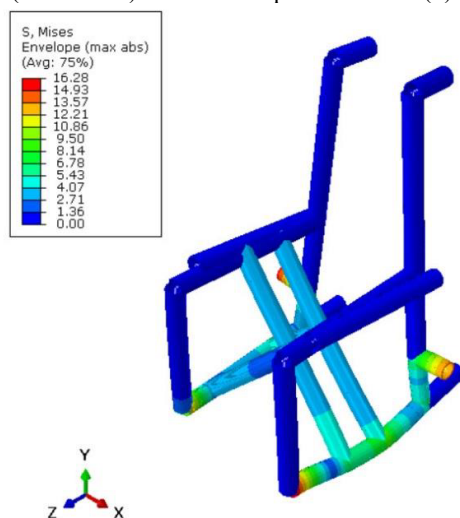
modelo (b) (Figura 32) percebe-se em grande parte da estrutura a cor azul e verde, sendo que os valores ficam na faixa de 0 a 10,86MPa, e uma tensão máxima desenvolvida de 16,28MPa. Em relação a esse modelo percebe-se que o valor é inferior a resistência a tração (53MPa), tendo um coeficiente segurança de 3,3. Assim demonstrando que resistiria ao carregamento. E por fim para o modelo (c) (Figura 33) também apresentou valores na cor a azul (0 a 7,65MPa) e tendo pontos alaranjados e vermelhos na região onde encontram-se as rodas (apoio) com tensão máxima de 45,88MPa. Relacionando com a resistência à tração desse material (53MPa) teria um valor de tensão de aproximadamente 1,2, apresentando que resistiria ao carregamento.

Figura 31: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (a) da cadeira de rodas de polímero.



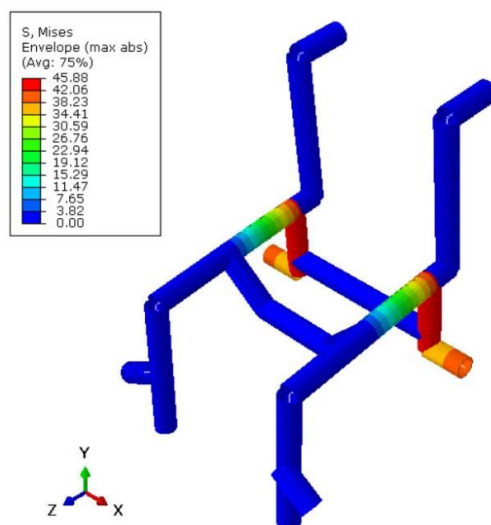
Fonte: De autoria própria, 2022.

Figura 32: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (b) da cadeira de rodas de polímero.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Figura 33: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o modelo (c) da cadeira de rodas de polímero.

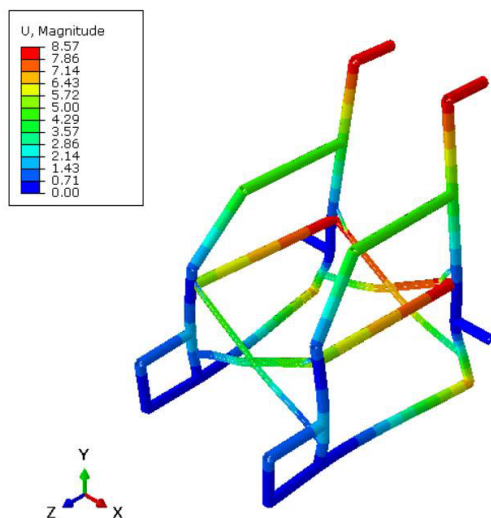


Fonte: De autoria própria, 2022.

Partindo para a análise da deformação através das Figuras 34, 35 e 36 percebe-se que há uma disparidade entre os valores do Módulo de Elasticidade dos dois primeiros materiais (aço e poliéster orto-tereftálico), o que resultará em valores de deformação por deflexão maior para o polímero.

Mostrando uma coloração em sua proporção mais voltado para o tom azul e verde, a Figura 34 mostra que o valor de deslocamento que ficou na faixa de 0 a 5,72mm para o modelo (a), apresentando valor de deslocamento máximo de 8,57mm. Valor esse que o material da CRM não irá suportar, por apresentar uma tensão desenvolvida maior que a resistência à tração.

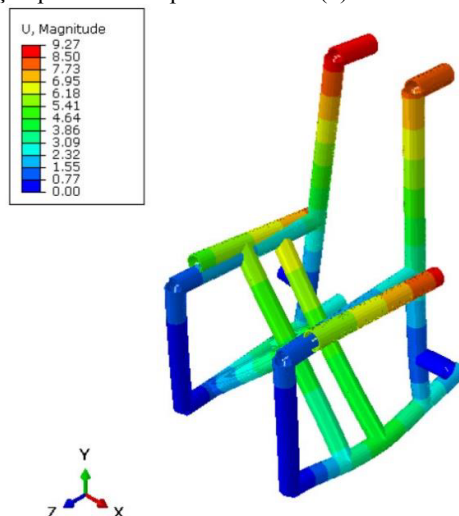
Figura 34: Deformação por deflexão para o modelo (a) da cadeira de rodas de polímero.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Para o modelo (b) (Figura 35) os valores ficaram entre 0 e 6,18mm de deformação, apresentando valor de deslocamento máximo de 9,27mm. Assim como o valor da tensão admissível foi menor que a resistência à tração, com coeficiente de segurança de 3,3, esse modelo suportaria o carregamento sem se romper.

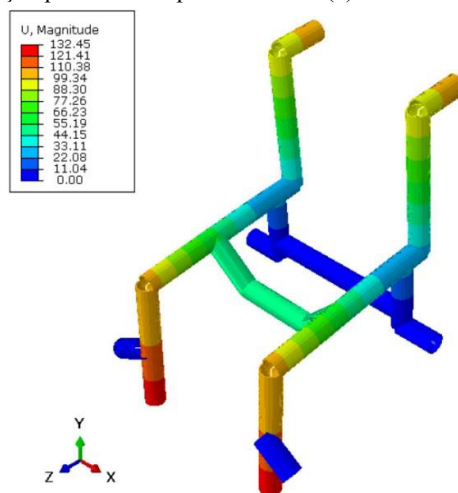
Figura 35: Deformação por deflexão para o modelo (b) da cadeira de rodas de polímero.



Fonte: De autoria própria, 2022.

E como já visto para o aço, o modelo (c) de polímero (Figura 36) apresenta valores bem maiores que os dois modelos anteriores, sendo que neste o alcance está na faixa de 0 a 88,3mm de deformação por deflexão, alcançando um valor máximo de deslocamento de 132,45mm. Assim, percebe-se que o modelo (c) expõe maior **deformação** por deflexão devido ao carregamento de 2450N que foi aplicado na estrutura da cadeira de rodas. Esses valores da deformação por deflexão são considerados altos e tornaria impraticável a utilização deste material neste modelo de cadeira mesmo apresentando coeficiente de segurança de 1,2.

Figura 36: Deformação por deflexão para o modelo (c) da cadeira de rodas de polímero.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Na tabela 10 estão apresentados os valores máximos de Von Mises e deformação de deflexão para todos os modelos da estrutura de CRM simulados considerado para o polímero. E destacando que apenas o modelo (b) que resistiria ao carregamento de 2450N por apresentar tensão admissível menor que a resistência à tração e baixa deformação por deflexão.

Tabela 10: Comparativo entre os valores de Von Mises e deformação por deflexão dos três modelos para o polímero.

Cadeira de Rodas	Von Mises (MPa)	Deformação por Deflexão (mm)
Modelo (a)	105,29	8,57
Modelo (b)	16,28	9,27
Modelo (c)	45,88	132,45

Fonte: De autoria própria, 2022.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE A SIMULAÇÃO DA CADEIRA DE RODAS PARA AÇO E POLÍMERO

A Tabela 11 tem os resultados para todos os modelos de CRM simulados considerando o aço e o poliéster como material utilizado para fabricação da estrutura, mostrando que os valores para a distribuição da tensão máxima de Von Mises (depende somente da estrutura e da carga) são aproximadamente iguais, devido à estrutura física ser igual para ambos os materiais e, assim, o carregamento (2450N) ser distribuído igualmente pela área deste equipamento, mesmo existindo uma grande diferença no módulo de elasticidade destes. Quando são analisados os valores da máxima deformação por deflexão, percebe-se que o polímero apresenta valores maiores que o aço, o que já era esperado pela significativa diferença do Módulo de Young dos materiais simulados. Sendo que, pelo carregamento utilizado de 2450N, apenas o modelo (b) da CRM de polímero suportou a carga comparada à resistência à tração de 53MPa, apresentando uma deformação considerável para análise estática.

Tabela 11: Comparativo entre os valores de Von Mises e deformação por deflexão dos três modelos para o aço e o polímero.

Materiais	Cadeira de Rodas	Von Mises (MPa)	Deformação por Deflexão (mm)
Aço	Modelo (a)	105,15	0,12
	Modelo (b)	14,63	0,13
	Modelo (c)	42,76	1,84
Polímero	Modelo (a)	105,29	8,57
	Modelo (b)	16,28	9,27
	Modelo (c)	45,88	132,45

Fonte: De autoria própria, 2022.

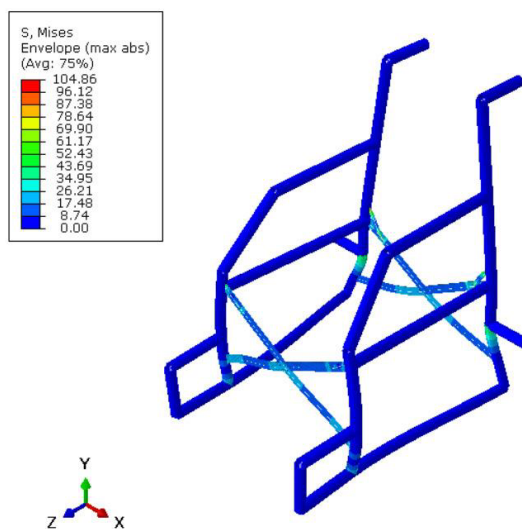
4.4 SIMULAÇÃO PARA O PORFL NA ESTRUTURA REAL

Algo que foi observado nas pesquisas realizadas para chegar a um valor médio para o PORFL foi que alguns fatores podem influenciar na obtenção de diferentes valores para o Módulo de Young, são eles: processo de fabricação do compósito, o tratamento das fibras, a aderência da matriz com o reforço, a utilização do vácuo para impedir a formação de bolhas, etc. Assim, utilizou-se quatro trabalhos para a coleta de dados experimentais a serem utilizados para alimentação de parâmetros no software de simulação. Esses trabalhos foram fundamentais e ajudaram muito para entender como é importante conhecer o tipo de material e o processo escolhido para confecção do mesmo.

O valor médio do Módulo de Elasticidade para o compósito foi de 2,79 Gpa, como mostrado na Tabela 5. E ao comparar com o valor do Módulo de Young do polímero que foi de 2,9 GPa, que é uma variação muito pequena. Além disso, outro fator que mudou e vai influenciar nos resultados para as simulações é o coeficiente de Poisson, que foi considerado como sendo 0,25 (OLIVEIRA, 2015, p. 78; GUIMARÃES, 2018, p. 63), e o dos outros materiais foram 0,33 (aço) e de 0,37 (polímero) (PIERIN, 2005, p. 20). Assim, diante do que foi exposto anteriormente, sabe-se que os valores serão próximos ao valor obtido para o material da matriz deste compósito. Porém, essa pequena mudança no valor do coeficiente de Poisson vai gerar alteração nos valores da tensão de Von Mises, enquanto o módulo de elasticidade vai influenciar no valor da deformação por deflexão.

Como demonstrado na Figura 37, como nos casos anteriores, a cor predominante continua sendo azul e alguns pontos verdes e os valores ficam variando de 0 a 69,9MPa para as tensões de Von Mises, atingindo um valor máximo de 104,86MPa. Resultado esse que ficou bem acima do valor da resistência à tração do PORFL que é de 45,82MPa, ou seja, essa estrutura para o compósito não resistirá ao carregamento de 2450N.

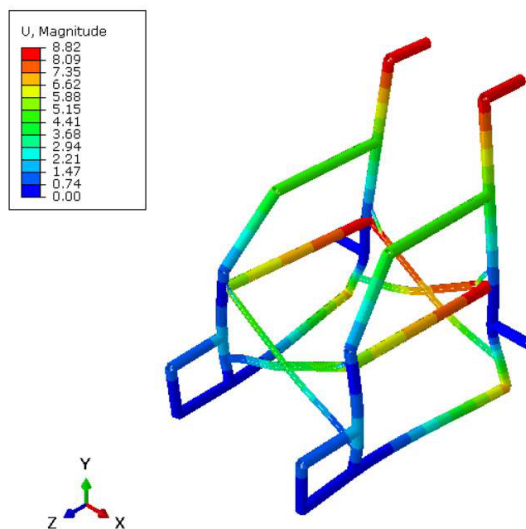
Figura 37: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas real.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Já a Figura 38, irá mostra os valores referentes à deformação sofrida devido à deflexão, sendo que as cores predominantes estão sendo representadas pelas cores azul e verde, as quais possuem valores de 0 a 5,88mm, e máximo deslocamento de 8,82mm. Como já foi concluído, para a tensão a ser desenvolvida na estrutura, essa cadeira romperia com a carga a ser aplicada.

Figura 38: Deformação por deflexão para o poliéster orto-tereftálico com fibra de licuri na cadeira de rodas real.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Na Tabela 12 estão os valores máximos, tanto da tensão de Von Mises e da deformação por deflexão, para o PORFL para a estrutura da CRM real.

Tabela 12: Resultado dos valores de Von Mises e da deformação por deflexão para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas real.

Cadeira de Rodas	Von Mises (MPa)	Deformação por Deflexão (mm)
Real	104,86	8,82

Fonte: De autoria própria, 2022.

Ao analisar os valores obtidos para o polímero e para o compósito, muitas perguntas podem estar surgindo referentes à diferença entre esses dois materiais, considerando que o compósito deveria apresentar valores melhores que o polímero, devido às suas características. Mas vários fatores ainda em estudo podem influenciar nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos reforçados com fibras vegetais, algumas delas são: o tipo de matriz e fibra, o tratamento da fase polimérica, a fração volumétrica das fases, a orientação e o tratamento da fibra, o comprimento, o processo de fabricação, entre outros (SILVA, 2011). Sendo que esses fatores influenciarão nos valores do módulo de Young e do coeficiente de Poisson, refletindo nos resultados que foram obtidos na simulação, pois são dados importante de entrada deste.

É evidente que, pelas configurações e por terem sido utilizados quatro trabalhos para fundamentar esta pesquisa, foi utilizada a média de vários valores para o Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson, que na prática podem ser melhorados e apresentar resultados mais satisfatórios para o tipo de compósito em estudo.

Com os valores encontrados para o compósito em estudo percebeu-se a necessidade de buscar melhorias (otimização) na estrutura da CRM para melhorar esses resultados. Pois esse equipamento não resisitiria ao carregamento por ter apresentado uma tensão máxima de Von Mises de 104,86MPa, que foi maior que a resistência à tração de 45,82MPa do PORFL. Assim, essa otimização da CRM também passará por simulação, para analisar a possibilidade de aplicar este material no equipamento.

Com isso, foram realizadas algumas mudanças na estrutura da cadeira para verificar como a estrutura se comportaria diante da carga aplicada. O próximo item trará com mais detalhes essa otimização que foi necessária para avaliar a aplicação do compósito.

4.5 SIMULAÇÃO PARA O PORFL NA ESTRUTURA OTIMIZADA

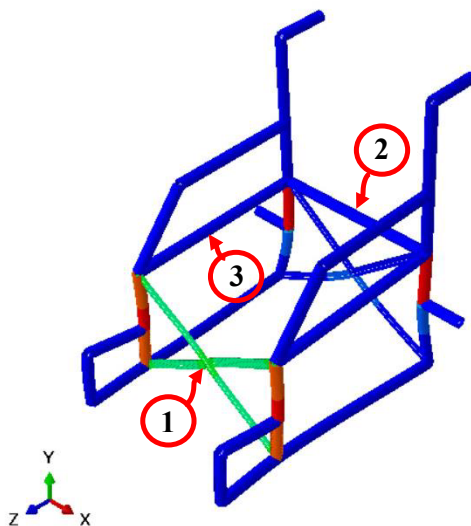
Como dito anteriormente, foram necessárias algumas mudanças para tentar a aplicação desse compósito na cadeira de rodas. O que foi notado nos resultados para esse material foi que,

devido à alta deformação por deflexão e tensão a ser desenvolvida na estrutura da CRM maior que a resistência à tração do compósito, a cadeira real não resistiria à aplicação da carga de 2450N. Então, passou-se a sugerir a realização de mudanças na estrutura e a verificar como se comportavam diante das simulações. Com os resultados que foram obtidos nas simulações, chegou-se ao modelo que está representado nas Figuras 39 a 41, apresentando resultados satisfatórios e que possibilitam a aplicação desse material na CRM. A aplicação desse compósito e a redução dos valores de tensão e deformação por deflexão só foi possível, pois buscou-se uma estrutura mais rígida para CRM deste material.

As mudanças realizadas e que podem gerar questionamentos, estão relacionadas ao fato de que a cadeira teve que ficar firme, não podendo ser dobrável. Assim, ela entraria para a classificação de cadeiras de rodas monobloco (rígidas), sendo que essas CRM rígidas são mais leves e resistentes, e são muito utilizadas em cadeiras para o esporte adaptado, cadeiras elétricas ou para banho.

Para apresentar os resultados que foram obtidos, é necessário apresentar as mudanças realizadas para aperfeiçoar o equipamento (Figura 39), as quais foram três. A mudança 1 foi na estrutura em X da CRM, que era responsável por permitir o dobramento desta, que passou a ser fixo nas hastes laterais. A mudança 2 foi adicionar mais um tubo na região traseira acima do X com o objetivo de deixá-la mais rígida. E a mudança 3 foi deixar os tubos que ficam ligados ao final da haste do X (parte superior), que eram moveis para permitir que dobrassem a CRM, passaram a ser fixos.

Figura 39: Mudanças realizadas na cadeira de rodas otimizada.

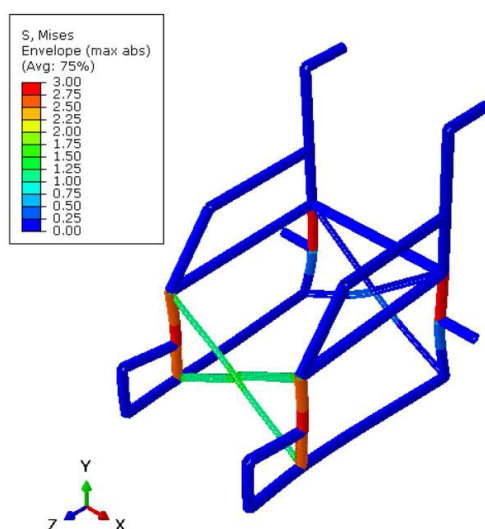


Fonte: De autoria própria, 2022.

Com essas mudanças foi possível obter resultados que estão representados na Figura 40.

Os dados que foram adquiridos ficaram entre as cores azul, verde e vermelho. Se a análise fosse feita em relação às cores, já seria necessário ligar o sinal de alerta. Mas, quando vão ser examinados os valores que foram alcançados, observamos que ficaram na faixa de **0 a 3,0MPa**. Esse resultado é menor quando comparados aos resultados tanto para o aço, como também para o polímero e o PORFL utilizado na CRM real. E o mais importante, a tensão máxima a ser desenvolvida, que foi de **3,0MPa**, ficou abaixo da resistência à tração, que é de **45,82MPa**. Desse modo, obtém-se um coeficiente de segurança de aproximadamente 15. Assim, a CRM de PORFL iria suporta ao carregamento que foi aplicado.

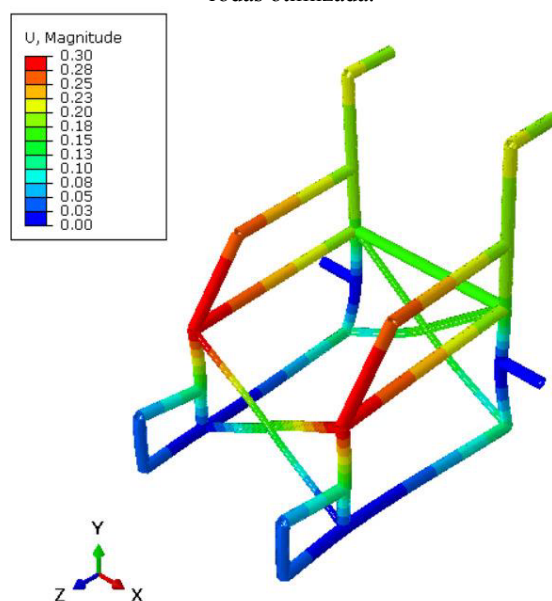
Figura 40: Modo como a carga (Von Mises) é distribuída para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas otimizada.



Fonte: De autoria própria, 2022.

Já na Figura 41 são apresentados os valores referentes à deformação sofrida devido à deflexão, sendo que as cores predominantes estão sendo representadas pela cor vermelha, as quais possuem valores de 0 a 0,30mm. Dessa maneira mostrando uma melhora em relação ao resultado para a CRM com a estrutura real, mostrando que essa otimização na estrutura da cadeira reduziu os valores tanto para as tensões de Von Mises quanto para a deformação.

Figura 41: Deformação por deflexão para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas otimizada.



Fonte: De autoria própria, 2022.

A Tabela 13 apresenta os resultados máximos obtidos para as simulações do compósito na cadeira de rodas otimizada.

Tabela 13: Resultado dos valores de Von Mises e da deformação por deflexão para o poliéster orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri na cadeira de rodas otimizada.

Cadeira de rodas	Von Mises (MPa)	Deformação por deflexão (mm)
Otimizada	3,0	0,30

Fonte: De autoria própria, 2022.

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE A SIMULAÇÃO DA CADEIRA DE RODAS PARA O POLIÉSTER ORTO-TEREFTÁLICO REFORÇADO COM FIBRA DE LICURI NA ESTRUTURA REAL E OTIMIZADA

Diante de todas essas etapas que foram seguidas para dar embasamento a esta pesquisa, desde a simulação de um material já utilizado e também o material que é utilizado na matriz desse compósito, obtém-se resultados satisfatórios e que demonstram a importância da pesquisa de novos materiais e como aplicá-los, assim sendo feito para o compósito polimérico reforçado com fibra de licuri.

Para ter uma melhor análise de todo esse contexto utilizou-se a Tabela 14 com o fim de apresentar todos os resultados obtidos nas simulações para os materiais que foram utilizados neste trabalho. Com os valores que estão representados nesta tabela, observam-se os resultados das simulações para todos os materiais, sendo que os valores obtidos para a CRM de PORFL

com estrutura otimizada apresentaram resultados de deformação por deflexão próximos ao do aço e tensão de Von Mises menor.

Tabela 14: Resultado dos valores de Von Mises e da deformação por deflexão para todos os materiais.

Materiais	Cadeira de rodas	Von Mises (MPa)	Deformação por Deflexão (mm)
Aço	Modelo 1	105,15	0,12
	Modelo 2	14,63	0,13
	Modelo 3	42,76	1,84
Polímero	Modelo 1	105,29	8,57
	Modelo 2	16,28	9,27
	Modelo 3	45,88	132,45
CPRFL	Real	104,86	8,82
CPRFL	Otimizada	3,0	0,30

Fonte: De autoria própria, 2022.

Assim demonstrando que, apesar dos baixos valores de módulo de elasticidade do compósito, com a otimização da estrutura da CRM em uma análise estática conseguiria aplicar este material em sua estrutura. Sendo necessário dar andamento a esta pesquisa para verificar em uma situação real como a cadeira de rodas se comportaria.

5 CONCLUSÕES

Após as simulações realizadas e análises dos resultados, foi possível destacar os seguintes pontos:

- É possível a aplicação do Políester orto-tereftálico reforçado com fibra de licuri, desde que realizando modificação na estrutura da cadeira. Essa possível utilização foi observada por meio das simulações realizadas em análise estática;
- Com a otimização da estrutura da cadeira de rodas foi obtida redução nos valores da tensão de Von Mises de 104,86MPa (modelo real) para 3,0MPa, e em relação à deformação por deflexão, foi reduzida de 8,82mm (modelo real) para 0,30mm (modelo otimizado).
- Os valores da deformação por deflexão do PORFL na CRM otimizada ficaram próximos dos valores que foram obtidos para o aço (material já utilizado nas cadeiras de rodas), os quais foram de 0,30mm e 0,12mm, respectivamente.
- Uma variação do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson ocasiona mudanças nos valores da tensão de Von Mises e na deformação por deflexão. Isso pode ser demonstrado nos resultados para o polímero e PORFL, os quais possuem Módulo de Elasticidade e coeficiente de Poisson iguais a 2,9MPa e 0,37 para o polímero e 2,79MPa e 0,25 para o compósito. Apresentaram os seguintes resultados para a tensão de Von Mises e deformação por deflexão 105,29MPa e 8,57mm para o polímero e para CPRFL de 104,86MPa e 8,82mm.
- Para os resultados apresentados, a estrutura física da cadeira de rodas tem que ficar mais rígida, não podendo ser como ocorre no modelo real que pode ter partes móveis para facilitar o transporte das mesmas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a confecção de corpos de provas com tecidos no sentido bidirecionais;
- Utilizar outros tipos de fibras como reforço do compósito;
- Confeccionar protótipo da cadeira de rodas do compósito;
- Realizar ensaios no protótipo.

REFERÊNCIAS

- ABNT Coleção. ABNT Coleção: Normas técnicas para um Mundo de Oportunidades. Página inicial. Disponível em: <<https://www.abntcolegao.com.br/mpf/grid.aspx>>. Acesso em: 20 de jan. de 2023.
- ACADEF. ACADEF - Associação Canoense de Deficientes Físicos, 2023. Disponível em: <<http://www.acadef.com.br/wp-content/uploads/2019/06/CADEIRA-DE-RODAS-MODELO-MA3-e-MA3S.pdf>>. Acesso em: 05 de jan. de 2023.
- AHMAD, M. N.; MAIDIN, N. A.; RAHMAN, M. H. A.; OSMAN, M. H.; (2017). **Conceptual Design Selection of Manual Wheelchair for Elderly by Analytical Hierarchy Process (AHP) Method: A Case Study**. International Journal of Applied Engineering Research, 12, 6710-6719.
- ALMEIDA, Jayann Ismar Lira. **ANÁLISE NUMÉRICA TRANSIENTE TÉRMICA ESTRUTURAL DAS TENSÕES RESIDUAIS EM VASOS DE PRESSÃO CILÍNDRICOS SUBMETIDOS A REPARO POR SOLDA DE ACORDO COM A NORMA ASME PCC-2-2015**. 2017. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- ASHIK, K. P.; SHARMA, R. S. A Review on mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**. In.: Scientific Research Publishing, 2015.
- BASTOS, Lourenço Manuel Ferreira. **Modelação constitutiva de materiais carregados com fibras**. 2015. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Polímeros, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2015.
- BERSCH, R. **Introdução à Tecnologia Assistiva**, Porto Alegre, 2017. 20.
- BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J.; **Composites reinforced with cellulose based fibres**. Prog. Polym. Sci. 24 (1999) 221-274.
- BRAGA, A. B. – **Análise da Utilização de Fibras Naturais Aglutinadas com Resina Epóxi, para Fabricação de uma Cobertura Central do Porta-malas de um Automóvel de Passageiros**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2010.
- BRAIDOT, A. A.; ALEMAN, G. L. Design of a mechanical system in gait rehabilitation with progressive addition of weight. In: IOP PUBLISHING. Journal of Physics: Conference Series. [S.l.], 2011. v. 332, n. 1, p. 012045.

BRESSIANI JÚNIOR, I., BELINI, U. L., ELLENBERGER, A., & KEINERT, A. C. (2020). FIBRAS NATURAIS E COMPÓSITOS NAS INDÚSTRIAS DE MOBILIDADE. *IX Sustentável*, 6(4), 129–138. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n4.129-138>

CALLISTER, Willian D. Jr. e RETHWISCH David G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. 9º ed.. tradução Sérgio Murilo Stamile Soares; revisão técnica José Roberto Moraes d’Almeida. – Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CAO, X.; CHEN, Y.; CHANG, P. R.; STUMBORG, M.; HUNEAULT, M. A. **Green Composites Reforced With Hemp Nanocrystals in Plasticized Starh**. *Journal of Applied Polymer Science*, v.109, p.3804-3810, 2008.

CANEVAROLO Jr., S. V. **Ciencia dos polimeros**. São Carlos: Artliber, 2006.

CASTRO, B. F. M. **Estudo e caracterização de compósitos reforçados com fibras naturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Politécnico do Porto, 2013.

CHANDRUPATLA, T.R., BELEGUNDU, A.D., 2014 “Elementos Finitos”. 4 a Edição, Ed. Pearson;

CONCEIÇÃO, Ana Cláudia Rangel da. **INFLUÊNCIA DA UMIDADE NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR FIBRAS VEGETAIS**. 2021. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pós-Graduação, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

COSTA, Dalmo Inácio Galdez. **NOVA FORMULAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO PARA ASSOCIAÇÃO DE PLACAS ESPESSAS**. 2014. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

COTA, F. de P.; BALDO, D.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L. ESTUDO NUMÉRICO COMPARATIVO DO EMPREGO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS NA CONSTRUÇÃO DE UMA CADEIRA DE RODAS. **Ciência & Tecnologia**, [S. l.], v. 3, n. 1, 2011. Disponível em: <https://citec.fatecjab.edu.br/index.php/citec/article/view/58>. Acesso em: 5 jan. 2022.

CUNHA, Maurílio Antônio de Castro Dias. **ANÁLISE NUMÉRICA DE MODELOS DE DANO BASEADOS NA MICROMECAÂNICA DE DEFEITOS**. 2014. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Integridade de Materiais da Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia, Faculdade Gama e Faculdade de

Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

DANIEL, I; ISHAI, O.; **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Oxford University Press, New York, 2a Edição, 2006.

DOS SANTOS, W. R. G. **Transferência de Calor e Massa em Materiais Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras Vegetais: Modelagem Avançada e Simulação**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade de Campina Grande, Paraíba. Campina Grande, 2019.

DE LAS CASAS, E.B., 2013 “Notas sobre o Método dos Elementos Finitos - Versão beta”, CADETEC, UFMG

DELLAMED, 2022. Disponível em: < <https://www.dellamed.com.br/linha-home-care/cadeiras-de-rodas/cadeira-de-rodas-de-aluminio-d600>>. Acesso em: 05 maio 2022.

DRUMOND, m. A.; **Licuri Syarus coronata (Mart.) eBcc Embrapa Semi-árido Petrolina-PE** 2007.

EICHHORN, S. J.; ZAFEIROPOULOS, N.; BAILLIE, C. A.; MWAIKAMBO, L. Y.; ANSELL, M. P., DUFRESNE, A.; ENTWISTLE, K. M., HURRIER-FRANCO, P. J.; ESCAMILLA, G. C.; GROOM, L.; HUGHES, M.; HILL, C.; RIALS, T. G.; WILD, P. M.; **Review Current international research info cellulosic fibres and composites**. Journal of materials Science. 36 (2001) 2107-2131.

FARIA, P. E. – **Estudo sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi Reforçado com Fibras de Vidro**. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2007.

FELIPE, R. C. T. dos S.; FELIPE, R. N. B.; CALDAS, A. C. de M.; AQUINO, E. M. F. Polymer Composites Reinforced with Hybrid Fiber fabrics. **Materials Research**, v.20, n.2, pp.555-567, 2017.

FERREIRA, João Paulo Lemos. **ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE COMPÓSITO DE BAMBU DE ALTA DENSIDADE PARA USO ESTRUTURAL**. 2019. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

FITZGERALD, S.; COOPER, R. A.; BONINGER, M. L.; RENTSCHLER, A. J. (2001). **Comparison of fatigue live for 3 types of manual wheelchairs**. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, 82, 1484-1488. DOI: <https://doi.org/10.1053/apmr.2001.26139>.

FUENTES, C.A.; TING, K.W.; DUPONT-GILLAIN, C.; STEENSMA, M.; TALMA, A. G.; ZUIJDERDUIN, R.; VAN VUURE, A.W. Effect of humidity during manufacturing on the interfacial strength of non-pre-dried flax fibre/unsaturated polyester composites. **Composites: Part A**, v.84, p. 209–215, 2016.

GUIMARÃES, Fernando Alves. **Avaliação das propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz termoplástica PPS reforçado com fibras de carbono contínuas e descontínuas**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

GUNAWARMAN, B.; NIINOMI, M.; AKAHORI, T.; SOUMA, T.; IKEDA, M.; & TODA, H. (2005). Mechanical properties and microstructures of low cost β titanium alloys for healthcare applications. *Materials Science and Engineering C*, **25**, 304-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2004.12.015>

GUPTA, M.K. and SRIVASTAVA, R.K. A review on characterization of hybrid fibre reinforced polymer composite. **American Journal Polymer Science Engineering**, v.4, n.1, pp.1-7, 2016.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An introduction to composite materials**. 3rd. Ed., Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2019.

HYBOIS, S.; PUCHAUD, P.; BOURGAIN, M.; LOMBART, A.; BASCOU, J.; LAVASTE, F.; FODÉ, P.; PILLET, H.; SAURET, C.; (2019). **Comparison of shoulder kinematic chain models and their influence on kinematics and kinetics in the study of manual wheelchair propulsion**. *Medical Engineering and Physics*, **69**, 153-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2019.06.002>.

IDICULA, M. A.; BOUDENNE, A. B.; UMADEVI, L. C.; IBOS, L. B.; CANDAU, I. B.; THOMAS, S.; **Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites**. *Composites Science and Technology* **66** (2006) 2719-2725.

ISMAIL, A. M. Design and Analysis of Wheelchair in Term of Daily Usage. Tese (Doutorado) - UMP, 2012.

JAJAM, K. C.; TIPPUR, H. V. Quasi-static and dynamic fracture behavior of particulate polymer composites: A study of nano- vs. micro-size filler and loading-rate effects. **Composites: Part B**. Vol.43, p.3467-3481, 2012.

JARIWALA, H.; JAIN, P. A review on mechanical behavior of natural fiber reinforced polymer composites and its applications. **Journal Reinforced Plastics Composite**, **38**(10): 441-453, 2019. doi:10.1177/0731684419828524.

LEÃO, Mirtânia Antunes. **Fibras de licuri: um reforço vegetal alternativo de compósitos poliméricos**. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

LEAO, M. A.; **Compósitos poliméricos a base de fibras de licuri: efeitos da hibridização e do envelhecimento ambiental acelerado**. Tese (Doutorado em Engenharia do Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

LISBOA, Carlos. DA COSTA, Dhone Victor. SANTOS, Leon Denis Rodrigues dos; **PROTÓTIPO DE UM DOBRADOR MANUAL DE TUBOS**. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXVIII, N°. 000148, 23/11/2018.

LOGAN, D.L.L., 2012, “*A first course in the finite element method*”. Fifth Edition. Delhi: India;

LORENZI, H. – **Flora brasileira Lorenzi: Arecaceae (palmeiras)**. 1 ed. São Paulo: Nova Odessa, 2010, 367p.

MARQUES, Leomar Santos. **ANÁLISE DE TENSÕES E DESLOCAMENTOS EM UMA CADEIRA DE RODAS COMERCIAL VIA SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**. 2019. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Sistemas e Automação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

MCGREGOR, O.P.L.; DUHOVIC M.; SOMASHEKAR, A. A.; BHATTACHARYYA, D. Pre-impregnated natural fibre-thermoplastic composite tape manufacture using a novel process. **Composite Part A Appl Sci Manuf**, 101:59-71, 2017. doi: 10.1016/j.compositesa.2017.05.025.

MENDES, R. B.; TIBÚRCIO, T. M. D. S. **Cadeira de Rodas Manual: O Impacto dos Problemas Relacionados a Tecnologia Assistiva na Melhoria da Qualidade de Vida de Pessoas com Mobilidade Reduzida**. Artefactum – Revista de Estudos em Linguagem e Tecnologia, n. 01/2016, p. 11, Janeiro 2016.

MIRANDA, C. S.; **Utilização da glicerina e ácidos dicarboxílicos no desenvolvimento de compósitos reforçados com rejeito de fibra de piaçava**. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal da Bahia. 2011.

MISTARIHI, M. Z., OKOUR, R. A., MUMANI, A. A. (2020). **An integration of a QFD model with Fuzzy-ANP approach for determining the importance weights for engineering characteristics of the proposed wheelchair design**. Applied Soft Computing Journal, 90, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106136>.

MOHAMMADI, M. **Stress concentration around a hole in a radially inhomogeneous plate**, International Journal of Solids and Structures, v.48, pp. 483–491, 2010.

MOKHOTHU, T. H.; JOHN M. J. Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their Biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, 131, 337–354, 2015. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.06.027.

MORAES, Alexandre S.; CONCEIÇÃO, Ana C. R. da; ALMEIDA, Pedro A. P.; SOUSA, Helen F.; V. NETO, Olímpio B. C.; LEÃO, Mirtânia A. **INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL DEGRADATION IN MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PERFORMANCE IN POLYMERIC COMPOSITES INCREASED BY LICURI FIBERS**. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, 4., 2018, Rio de Janeiro. **BCCM4**. Rio de Janeiro: BCCM4, 2018. p. 1-8.

MOTA, R. C. de S.. **Análise de viabilidade técnica de utilização da fibra de bananeira com resina sintética em compósitos**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MOTA, R. C. S. **Aproveitamento do Exocarpo do Licuri Particulado para Produção de um Compósito Utilizando como Matriz um Poliéster Ortoftálico**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

NEGRÃO, A. G.; PINTO, E. M.; SILVA, L. B. da. **Material compósito de fibra da folha do abacaxizeiro (Ananascomosus) para uso no ambiente construído**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 627-645, jul./set. 2020. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300459>

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 4a ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OBANDO-HERRERA, F. E.; FLORES-MUGMAL, T. G.; BARBERO-PALACIOS, J. I.; ORTEGA-BUSTAMANTE, L. A. Silla bipedestadora para personas con movilidad restringida grado iv en las extremidades inferiores con una capacidad de carga de 100kg. Respuestas, v. 22, n. 2, p. 76–86, 2017.

OLIVEIRA, M. H. **Principais matérias-primas utilizadas na indústria têxtil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 5, p. 71-109, mar.1997.

OLIVEIRA, Felipe Hörlle de. **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE COMPÓSITOS UNIDIRECIONAIS DE POLIÉSTER COM FIBRAS DE VIDRO OU DE CURAUÁ**. 2015.

96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

OLIVEIRA FILHO, Genilson Cunha de. **EFEITOS DA HIBRIDIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS REFORÇADOS POR TECIDO DE FIBRAS DE PIAÇAVA**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

ORTILINE, 2022. Disponível em: < <https://www.ortoline.net.br/cadeira-de-rodas-pl-002> >. Acesso em: 05 maio 2022

ORTOPEDIA JAGUARIBE, 2022. Disponível em: < <https://ortopediajaguaribe.com.br/produto/cadeira-de-rodas-speed/> >. Acesso em: 05 maio 2022

PARUL S. AND GUPTA M. K. Sisal (*Agave sisalana*) fibre and its polymer-based composites: A review on current developments. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v.36, n.24, pp.1759–1780, 2017.

PENEDO, W. R. - **Uso da Madeira para Fins Energéticos**. Belo Horizonte. Fundação CETEC, 1980.

PEREIRA, Clezidan Núcio. **ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA POR ELEMENTOS FINITOS DE UM CHASSI VEICULAR TIPO SPACEFRAME**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação Emmodelageme Otimização, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2016.

PETRACCONI, César; *Análise comparativa do comportamento de fadiga do gancho reboque posterior de um veículo automotor / César Petracconi*. Belo Horizonte, 2009.

PETTERSEN, R. C. – The chemical composition of wood. In: ROWELL, R.(ed). **The hemistryof solid wood**. Washington, American ChemicalSociety, 1984. p.54-126.

PIERIN, Igor. **ESTUDO DA ESTABILIDADE DE PERFIS DE MATERIAIS DE PRFV**. 2005. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

POLGLASS, 2022. Disponível em: <<https://polglass.com.br/wp-content/uploads/2016/02/Boletim-T%c3%a9cnico-Novapol-L-120.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2022.

QUINAYÁ, D. C. P.; D'ALMEIDA, J.R.M. Nondestructive characterization of epoxy matrix

composites reinforced with *Luffa* lignocellulosic fibers. **Revista Matéria**, v.22, n.2, 2017.

RAMOS, J. C.; **Polímeros quirias**: polipirris e politiofenos modificados com R-(-) ou S-(+)-N-(3,5-Dinitrobenzoi)- α -fenilglicina. 2007. 96 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

RAO, S. The finite element method in engineering, ed. [S.l.]: Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.

RICL, A; JOSÉ, N. M.; CARVALHO, R. F.; **Caracterização física e química da fibra da folha do licuri SYAGRU CORONATA (MARTIUS) BECCARI**, 2009.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J.S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. –**Cell Wall Chemistry**. Capítulo 03 do livro Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. Editado por Roger M. Rowell. Editora Taylor & Francis Group. New York, 2005.

SANTANA, Pietro Raphael Teodoro. **Investigação do efeito da adição de partículas cerâmicas na aderência ao cisalhamento de juntas de compósitos reforçados com fibra de vidro**. 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2016.

SANTOS, C. P.; REIS, I. N.; MOREIRA, J. E. B.; BRASILEIRO, L. B. – **Papel: como se fabrica?** Revista Química Nova na Escola, Sociedade Brasileira de Química, n.14, 2001.

SANTOS, Manfrine Silva; LOPES, Raimundo Valdan Pereira; LEITE, Jandecy Cabral; AFONSO, Marcus Roberto Binda; HERMENEGILDO, Eleodoro Rodriguez. Biocomposite from polyester reinforced with licuri leaves fiber (syagros coronata). **Journal Of Engineering And Technology For Industrial Applications (Jetia)**. Manaus, p. 61-66. set. 2015.

SANTOS, D. G. **Estudo termo-hídrico e caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra vegetal: simulação 3D e experimentação**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande/PB, 2017.

SHARMA, N. **Study of Water Absorption Behavior of Natural Fibre Reinforced Composites**. Master (Technology in Mechanical Engineering). National Institute of Technology Rourkela. India, 2014.

SHACKERLORD, J. F. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Pearson Education, 2008.

SILVA, C.; DANTAS, C.; FELIPE, R. Levantamento da utilização dos materiais compósitos reforçados com fibras naturais. In: CONNEPI, 4., 2009, Belém, PA. **Anais...** Belém, 2009.

SILVA, Isabela Leão Amaral da. **Propriedades e Estrutura de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Contínuas de Juta**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de

Engenharia e Ciências de Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

SILVA, L. H.; ABREU E LIMA, E. PROJETO E PROTÓTIPO DE UMA CADEIRA DE RODAS AUTOMATIZADA DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO TUBOS DE PVC. **Revista CIATEC-UPF**, v. 11, n. 2, p. 57-72, 9 jul. 2019.

SILVA, Leandro José da. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais**. 2011. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João del Rei, 2011.

SILVA FILHO, Walter Belarmino da. **DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE TRAÇÃO BIAIXIAL PARA ENSAIOS MECÂNICOS DE MATERIAIS**. 2017. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SMITH, W.F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciências dos Materiais**. 5rd. ed., Ed. McGraw-Hill, 734 p., 2012.

SPAK, Marcia Danieli Szeremeta, et al. "A DECISION SUPPORT METHODOLOGY FOR MATERIAL SELECTION IN THE DEVELOPMENT OF WHEELCHAIR PROJECTS/UMA METODOLOGIA DE APOIO A TOMADA DE DECISAO PARA A SELECAO DE MATERIAIS NO DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE CADEIRAS DE RODAS." *Revista Exacta*, vol. 20, no. 1, Jan.-Mar. 2022, pp. 159+. *Gale Academic OneFile*, link.gale.com/apps/doc/A694469580/AONE?u=anon~f5e22268&sid=googleScholar&xid=4de47044. Accessed 5 Fev. 2022.

SPINACÉ, M. A. S.; LAMBERT, C. S.; FERMOSELLI, K. K. G.; DE PAOLI, M. A.; **Characterization of lignocellulosic curauá fibres**. *Carbohydrate Polymers* 77. 47-53, 2009.

SPRIGLE, S. (2009). **On Impact of surface type, wheelchair weight, and position on wheelchair propulsion by novice older adults**. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 90, 1073-1075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2009.04.002>.

SUN, E. Q. **Shear Locking and Hourglassing in MSC Nastran, ABAQUS, and ANSYS**. Virtual Product Development Conference, 2006.

TODKAR, S. S.; PATIL, S. A. Review on mechanical properties evaluation of pineapple leaf fibre (PALF) reinforced polymer composites. **Composite Part B Eng**, 174:106927, 2019. doi:

10.1016/j.compositesb.2019.106927.

THOMAS, Natasha Ilse Rothbucher. **INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS EM FIBRAS DE LICURI NA ADERÊNCIA INTERFACIAL DO COMPÓSITO COM MATRIZ POLIÉSTER**. 2011. 234 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

USMA-ALVAREZ, C. C., SUBIC, A., BURTON, M., & FUSS, F. K. (2010). Identification of design requirements for rugby wheelchairs using the QFD method. *Procedia Engineering*, 2, 2749-2755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.061>

VITORINO, Luísa Sá. **Modificação da interface de compósitos de polipropileno com fibras de vidro pela técnica Layer-by-Layer**. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

WANG, M.; WEI, L.; ZHAO, T. **A Novel Codesation-Addition - Type Phenolic, Resin (MPN): synthesis, characterization and evaluation as matriz of composites**. *Polymer*, v.46, p. 9202-9210, 2005.

WARD, A. L.; SANJAK, M.; DUFFY, K.; BRAVVER, E.; WILLIAMS, N.; NICHOLS, M.; BROOKS, B. R.; (2010). **Power pheelchair prescription, utilization, satisfaction, and cost for patients with amyotrophic lateral sclerosis: preliminary data for evidence-based guidelines**. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 91, 268-272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2009.10.023>.

YUAN, Y.; GUAN, T. (2014). **Design of Individualized Wheelchairs Using AHP and Kano Model**. *Advances in Mechanical Engineering*, 14, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/242034>.