

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Guilherme Dagani Casagrande

**COMPÓSITO LAMINADO DE RESÍDUOS TÊXTEIS PARA APLICAÇÃO NO
PROCESSO DE DESIGN DE PRODUTOS**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2022

GUILHERME DAGANI CASAGRANDE

Compósito laminado de resíduos têxteis para aplicação no processo de design de produtos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Branca Freitas de Oliveira

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Casagrande, Guilherme Dagani
Compósito laminado de resíduos têxteis para
aplicação no processo de design de produtos /
Guilherme Dagani Casagrande. -- 2022.
88 f.
Orientador: Fábio Gonçalves Teixeira.

Coorientador: Branca Freitas Oliveira.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Arquitetura, Programa
de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Design e tecnologia. 2. Resíduos Têxteis. 3.
Compósito Laminado. 4. Caracterização de materiais. 5.
Simulações numéricas. I. Teixeira, Fábio Gonçalves,
orient. II. Oliveira, Branca Freitas, coorient. III.
Título.

COMPÓSITO LAMINADO DE RESÍDUOS TÊXTEIS PARA APLICAÇÃO NO PROCESSO DE DESIGN DE PRODUTOS

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 30 de novembro de 2022.

Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira**

Programa de Pós-Graduação em Design

Co-orientadora: **Prof^a. Dra. Branca Freitas de Oliveira**

Programa de Pós-Graduação em Design

Prof. Dr. Fernando Batista Bruno

Departamento de Design e Expressão Gráfica – DEG – Examinador Externo

Prof. Dr. Régio Pierre da Silva

Programa de Pós-Graduação em Design – Examinador Interno

Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Programa de Pós-Graduação em Design – Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Gonçalves Teixeira e a minha co-orientadora Prof^a. Dra. Branca Freitas de Oliveira, que nesta longa jornada sempre confiaram no meu trabalho, apoiaram e auxiliaram em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Fernando Batista Bruno, ao Prof. Dr. Régio Pierre da Silva e ao Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior pelo aceite e disponibilidade em compor a banca examinadora.

Ao Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido por me receber na maquetaria da Faculdade de Arquitetura – UFRGS e disponibilizar o laboratório para a realização dos ensaios de tração, ponto imprescindível para este trabalho.

Ao Prof. Dr. Sandro Campos Amico por me receber no GCOMP – UFRGS e disponibilizar o laboratório para a realização dos ensaios de cisalhamento, necessários para este trabalho.

Ao Prof. Dr. André Canal Marques por conceder acesso ao FabLab Unisinos e disponibilizar o uso software Granta Edupack 2021, necessário para a realização desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial ao corpo docente e funcionários.

Agradeço a Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante a realização do mestrado.

RESUMO

CASAGRANDE, G. D. **Compósito laminado de resíduos têxteis para aplicação no processo de design de produtos**. 2022. 88 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

O setor têxtil e confeccionista brasileiro está entre os cinco maiores do mundo e com grande destaque no ramo de jeanswear, este setor imponente traz benefícios econômicos e é responsável por milhares de empregos. Porém, é responsável por uma enorme quantidade de resíduos sólidos. São gerados, aproximadamente, cerca de 29.000 toneladas de resíduos têxteis, diariamente, apenas na cidade de São Paulo, e sua maior parte é tratada como rejeito, sendo destinados aos aterros sanitários ou incineração. Assim, há uma clara necessidade de aproveitamento destes resíduos, de forma a mitigar os impactos ambientais negativos causados por este grande setor, bem como dos resíduos pós-uso gerados pelo consumo exagerado da moda. Nesta perspectiva, a presente pesquisa reutiliza resíduos têxteis de denim, sólidos industriais e de pós-consumo, na produção de um material compósito laminado com matriz epóxi como alternativa de reutilização destes resíduos. A partir disso, foi realizada a caracterização deste material através de ensaios mecânicos de tração e cisalhamento para, assim, obter-se dados relevantes acerca das principais propriedades deste material compósito. A partir destes dados, foi feita a seleção de materiais similares para explorar futuras aplicações para o material compósito. Por fim, com os dados levantados nos ensaios de caracterização, foram realizadas simulações numéricas computacionais deste material para validar a hipótese de que a caracterização do material pode auxiliar no projeto de produto. Com os estudos realizados é possível afirmar que este compósito pode ser uma boa alternativa para reutilização de resíduos têxteis e tem como principais opções de áreas de aplicações: Utilidades domésticas; Mobiliários; Artesanato em geral.

Palavras-chave: Design e Tecnologia; Resíduos têxteis; Denim; Resina Epóxi; Ecologia Industrial; Compósito laminado; Caracterização de materiais; Simulações numéricas.

ABSTRACT

CASAGRANDE, G. D. **Laminated composite of textile waste for application in the product design process**. 2022. 88 p. Dissertation (Master in Design) – School of Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

The Brazilian textile and confectionery sector is among the five largest in the world and with great prominence in the Jeanswear business, this imposing sector brings economic benefits and is responsible for thousands of jobs. However, it is responsible for a huge amount of solid waste. Approximately 29,000 tons of textile waste is generated daily in the city of São Paulo alone, and its most are treated as rejection, being destined for landfills or incineration. Thus, there is a clear need to take advantage of these waste, in order to mitigate the negative environmental impacts caused by this large sector, as well as the post-use waste generated by the exaggerated consumption of fashion. In this perspective, this research reuses textile, industrial and post-consumer solids, in the production of a laminated composite material with epoxy matrix as an alternative to reuse these waste. From this, the characterization of this material was performed through mechanical tensile and shear tests to obtain relevant data about the main properties of this composite material. From this data, similar materials were selected to explore future applications to the composite material. Finally, with the data raised in the characterization tests, computational numerical simulations of this material were performed to validate the hypothesis that the characterization of the material can assist in the product design. With studies conducted it is possible to state that this composite can be a good alternative for reuse of textile waste and has as main options of application areas: Household utilities; Furniture; Crafts in general.

Keywords: Design and technology; Textile waste; Denim; Epoxy resin; Industrial Ecology; Laminated composite; Material characterization; Numerical simulations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma de reciclagem de resíduos têxteis	15
Figura 2 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração.....	28
Figura 3 - Orientação das fibras para o ensaio de cisalhamento planar	28
Figura 4 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento.....	29
Figura 5 - Exemplo de Mapa de Propriedades de Materiais	31
Figura 6 - Artefato e seus ambientes	35
Figura 7 - Etapas da design science research	36
Figura 8 - Estrutura de desenvolvimento da pesquisa.....	37
Figura 9 - Impregnação do tecido com a matriz epóxi.....	40
Figura 10 - Dados de entrada do material no software Granta Edupack	42
Figura 11 - Comparação corpo de prova físico e modelo virtual.....	44
Figura 12 - Operacionalização ScienceDirect	47
Figura 13 - Operacionalização Scopus	48
Figura 14 - Gráfico de tensão/deformação	52
Figura 15 - Ensaio X Simulação	54
Figura 16 - Placas de compósitos laminados	55
Figura 17 - Execução do ensaio de tração e rompimento	56
Figura 18 - Tensão X Deformação - Médias do ensaio de tração.....	57
Figura 19 - Execução do ensaio de cisalhamento e rompimento	58
Figura 20 - Médias do ensaio de cisalhamento	59
<i>Figura 21 - MPM1: Resistência à Tração vs. Alongamento.....</i>	<i>60</i>
Figura 22 - MPM2: Resistência à Tração vs. Módulo de Young	61
Figura 23 - MPM3: Resistência à Tração vs. Coeficiente de Poisson.....	62
Figura 24 - MPM4: Coeficiente de Poisson vs. Módulo de Young	62
Figura 25 - Produção do material compósito em pré-forma e plano de corte	67
Figura 26 - Montagem das peças antes do acabamento.....	68
Figura 27 - Processo de montagem dos óculos após acabamento	69
Figura 28 – Protótipos finalizados	70
Figura 29 - Resultados EV1: Tensões (σ_{XX}) no eixo X.....	71
Figura 30 - Resultados EV1: Deformações (ϵ_{xx}) no eixo X	72
Figura 31 - Resultados EV2: Tensões (σ_{XX}) no eixo X.....	72
Figura 32 - Resultados EV2: Deformações (ϵ_{xx}) no eixo X	73
Figura 33 - Resultados EV3: Tensões (σ_{XX}) no eixo X.....	73
Figura 34 - Resultados EV3: Deformações (ϵ_{xx}) no eixo X	74
Figura 35 - Comparativo entre valores reais e virtuais	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção brasileira de produtos acabados e respectivos desperdícios	16
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos componentes do material compósito de epóxi e tecido de linho.....	51
Tabela 3 - Resultados ensaio de tração.....	56
Tabela 4 - Resultados ensaio de cisalhamento.....	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estimativa de volume acumulado de resíduos têxteis destinados aos aterros em São Paulo a partir de 15/09/2017	14
Quadro 2 - Mapas de propriedades de materiais.....	43
Quadro 3 - Artigos finais RSL (continua)	48
Quadro 4 - Materiais selecionados com maior similaridade.....	63
Quadro 5 - Áreas mais promissoras para aplicação do compósito	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Delimitações da pesquisa	19
1.3	Problema de pesquisa.....	20
1.4	Hipótese	20
1.5	Objetivos	20
1.6	Justificativa.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	Materiais compósitos e resina epóxi.....	23
2.2	Caracterização de materiais.....	26
2.3	Seleção de materiais e design de produtos.....	29
2.4	Simulações numéricas	32
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1	Revisão sistemática da literatura	46
4.2	Placas do material compósito laminado com resíduos têxteis	54
4.3	Caracterização do material compósito.....	55
4.3.1	Ensaio Mecânico de Tração	55
4.3.2	Ensaio Mecânico de Cisalhamento.....	57
4.4	Seleção de materiais similares e possíveis aplicações	59
4.5	Exemplo de aplicação do material compósito laminado	67
4.6	Simulações numéricas do material compósito laminado	70
5	CONCLUSÃO.....	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

A seguir, são apresentados os tópicos introdutórios desta pesquisa científica. Inicialmente, na contextualização, são apresentados dados referentes ao panorama na busca pela sustentabilidade e informações sobre o setor têxtil e confeccionista brasileiro, bem como seu tamanho de mercado, impactos ambientais e iniciativas sustentáveis. Os demais tópicos da introdução referem-se à estruturação da presente pesquisa: são apontados quais os pontos que serviram de delimitação para determinar o campo de ação; Qual foi o problema de pesquisa que motivou este trabalho; A hipótese que serviu como ponto de partida para esta investigação; Quais objetivos foram planejados para guiar esta pesquisa; Por fim, o que justifica o desenvolvimento desta pesquisa.

1.1 Contextualização

A preocupação e busca por sustentabilidade é um tema cada vez mais necessário e constante no nosso cotidiano e, assim, governos, organizações e consumidores buscam incentivar projetos e iniciativas que contemplem melhorias neste tema. Em setembro de 2015, em Nova York, a ONU promoveu um encontro entre diversos países e a população global a fim de decidir sobre novos possíveis caminhos para um desenvolvimento sustentável em nosso planeta. Durante este encontro foi criada, então, a Agenda 2030, com o objetivo de criar diretrizes para alcançar, mundialmente, o desenvolvimento sustentável em suas três vertentes: econômica, social e ambiental. Nesta agenda são anunciados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas para guiar e estimular a ação para todos os países e partes interessadas nesta transformação (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015).

Dentre os 17 ODS listados, os de número 9 e 12 estão diretamente ligados às atividades que interferem em áreas de atuação de um(a) designer de produto. O Objetivo 9 “Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação” visa, entre outras metas:

- Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades;
- Fortalecer a pesquisa científica, melhorar as capacidades tecnológicas de setores industriais em todos os países, particularmente os países em

desenvolvimento, inclusive, até 2030, incentivando a inovação e aumentando substancialmente o número de trabalhadores de pesquisa e desenvolvimento por milhão de pessoas e os gastos públicos e privados em pesquisa e desenvolvimento.

O objetivo 12 “Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis” tem, entre outras, como suas metas:

- Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais
- Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reuso e reciclagem;
- Até 2030, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente.

Estes objetivos, anteriormente listados, estão diretamente relacionados ao trabalho de um(a) designer. Através de seu trabalho, é possível que o(a) designer possa trazer grandes resultados frente a busca por um desenvolvimento sustentável através da utilização de boas práticas nas etapas de projeto. Diversos setores da indústria brasileira apresentam números expressivos em geração de resíduos sólidos oriundos dos processos industriais e também do pós-consumo, muitas vezes sem haver medidas efetivas para redução destes números. Uma maneira de mitigar estes impactos negativos é através da reutilização e reciclagem desses resíduos sólidos, economizando, assim, recursos naturais, gastos de energia para produção e o descarte desnecessário de materiais.

O setor têxtil e confeccionista tem grande destaque na indústria brasileira, sendo a quinta maior indústria têxtil do mundo e a quarta maior em confecção. Conforme dados apresentados pela ABIT (2021) este setor é responsável pela geração de aproximadamente 1,5 milhão de trabalhos diretos e mais 8 milhões se forem adicionados os empregos indiretos e efeito renda, representando aproximadamente 11% dos empregos e 6,6% do faturamento da indústria de transformação brasileira. Em termos de produção, no ano de 2019 foram produzidas 9,04 bilhões de peças (vestuário + meias e acessórios + cama, mesa e banho), totalizando um faturamento de 185,7 bilhões de reais. O Brasil possui reconhecimento internacional no ramo de *jeanswear*, sendo o quarto maior produtor e consumidor de denim

do mundo, tendo autossuficiência na produção do algodão e tecelagens nacionais centenárias (ABIT, 2021).

O setor têxtil e de confecção, segundo dados do Instituto de Estudos e Marketing Industrial - IEMI (2016), possui mais de 32 mil empresas em todo o Brasil, sendo o Sudeste a região com maior produção e maior número de pessoal ocupado (49,4%). O estado de São Paulo possui grande destaque, contando com 27,7% da mão de obra total destes setores, sendo seguido por Santa Catarina com 15,5%, Minas Gerais com 13,5%, Paraná com 8,3%, Rio de Janeiro com 6,5%, Goiás com 5,1% e Rio Grande do Sul com 4,9%.

Como visto nos dados apresentados anteriormente, a cidade de São Paulo é destaque no setor têxtil e de confecção no país, cujos dois maiores polos de confecção e comercialização de vestuário são os bairros Bom Retiro e Brás. Diariamente são descartadas cerca de 20 toneladas de resíduos têxteis somente destas duas regiões e grande parte destes resíduos são tratados como rejeitos, sendo encaminhados aos aterros sanitários ou incineração. De acordo com dados levantados pela Sustexmoda - USP (2022), um grupo de pesquisa da Universidade de São Paulo que busca soluções sustentáveis para os impactos causados pela cadeia têxtil e indústria da moda, de 2017 até 2020, foram, em média, cerca de 29.000 toneladas de resíduos têxteis gerados por dia na cidade de São Paulo, dos quais a grande maioria são de materiais de corte produzidos em confecções e o restante de roupas pós-consumo como podemos observar na Quadro 1.

Quadro 1 - Estimativa de volume acumulado de resíduos têxteis destinados aos aterros em São Paulo a partir de 15/09/2017

Origem	18/02/2021
Roupa pós-consumo	9.944 toneladas
Resíduos de confecções	35.797 toneladas
TOTAL	45.740 toneladas

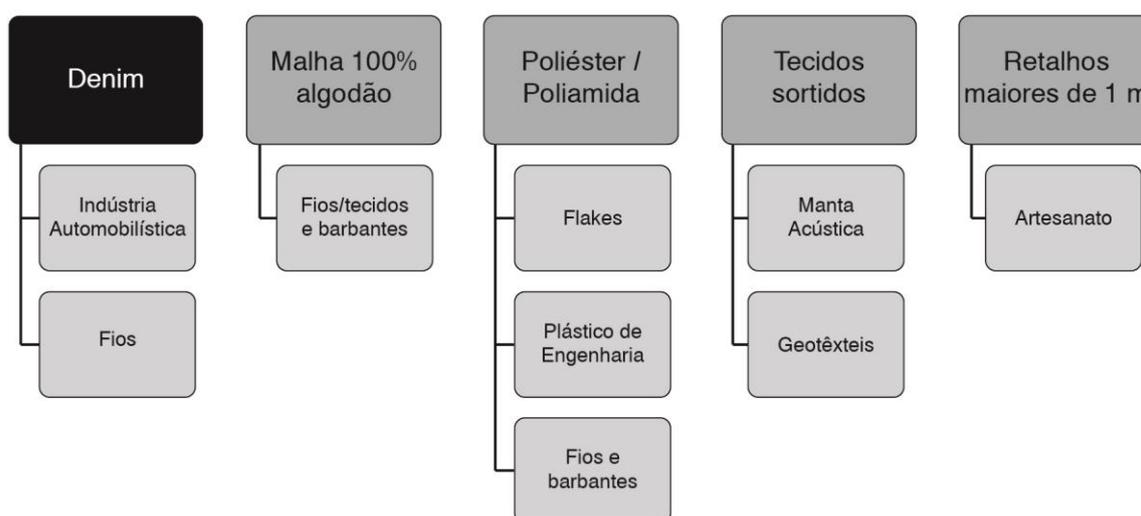
Fonte: Adaptado de Sustexmoda USP (2022).

Visando uma redução neste impacto ambiental o Sinditêxtil-SP, em parceria com a Prefeitura do Município de São Paulo, criou o projeto denominado Retalho Fashion, que tem como objetivo a organização, coleta, triagem e venda de resíduos sólidos têxteis produzidos nestas regiões (Sinditêxtil-SP, 2016). O projeto busca desenvolver um plano de gerenciamento de resíduos sólidos através da organização e promoção da coleta de resíduos

têxteis das confecções do bairro Bom Retiro. Com esta iniciativa, busca-se a preservação ambiental e a geração de renda com ocupação qualificada para promover condições socialmente justas de trabalho e estabelecer condições socioambientais e de limpeza da área envolvida. Assim como o Retalho Fashion, outras iniciativas similares vêm ocorrendo em outras cidades, como por exemplo, o Banco de Tecido em Porto Alegre que se dedica a solucionar a sobra de tecelagens, confecções e ateliês de regiões próximas, recolocando este material no mercado através de um sistema de venda e trocas. São iniciativas que promovem inúmeros benefícios sociais, ambientais e econômicos.

Na Figura 1, é possível verificar como os resíduos sólidos de diferentes materiais têxteis são separados atualmente e quais as principais finalidades empregadas em sua reciclagem/reutilização, quando ela ocorre.

Figura 1 - Organograma de reciclagem de resíduos têxteis



Fonte: Adaptado de Sinditêxtil-SP (2016).

Estima-se que a indústria têxtil descarte cerca de 15% de toda sua produção. A Tabela 1 apresenta um panorama do desperdício gerado pelas empresas confeccionistas brasileiras anualmente. Os dados ilustrados na Tabela 1, apesar de estarem desatualizados, são de grande importância para a visualização do impacto causado pelas empresas brasileiras de confecção. Para fins de atualização destes dados, entrou-se em contato com a Sinditêxtil-SP, via telefone, para verificação destas informações. Conforme consulta com profissionais da empresa, houve um aumento de aproximadamente 10% em relação a quantidade de produtos acabados do ano de 2013 para o ano de 2021, mantendo-se os mesmos percentuais em

relação aos desperdícios. Desta forma, é possível concluir que houve um aumento significativo no montante desperdiçado durante este período.

Tabela 1 - Produção brasileira de produtos acabados e respectivos desperdícios

Produção	Quantidade (t/ano)	Desperdícios
Vestuário	1.110.000	12%
Meias e acessórios	20.000	2%
Linha Lar	370.000	5%
Artigos Técnicos	300.000	5%

Fonte: Adaptado de Sinditêxtil-SP (2013).

Outro fator que deve ser levado em consideração é o consumo de moda, o que desenvolveu um enorme crescimento na produção em massa, o chamado *fast fashion*. Este tem como objetivo levar as tendências apresentadas nas passarelas o mais rápido possível para os centros comerciais e, conseqüentemente, para o consumidor. A produção rápida passou a ser prioridade entre as grandes marcas do ramo têxtil, como explica Edelkoort (2015). Marcas pertencentes a rede *fast fashion* passaram a enviar mensagens ao consumidor alusivas a “compre, use e jogue fora”. Um universo de escolhas produzidas em demasia dentro de um ciclo da moda cada vez mais rápido, as tendências transitam entre extremos de um dia para o outro com o simples intuito de conceber desejo ao público consumidor.

Segundo Fernandes (2013), o caráter efêmero deve ser salientado, pois tem criado o consumo exagerado e resultado em descarte acelerado das peças. Desta maneira, as tendências de moda acabam encurtando o período de uso das roupas levando ao descarte antecipado. Ao não desejar mais certa peça de vestuário, o consumidor final realiza o descarte e a peça chega aos aterros sanitários, tornando-se resíduos de difícil decomposição e contribuindo com a emissão de gases que causam o efeito estufa, como o metano.

Em contraponto às conseqüências geradas por esse movimento de consumo exacerbado, uma corrente contrária vem se inserindo no mercado como uma alternativa de conscientização econômica, social e ecológica em meio ao sistema da moda contemporânea. Como afirma Edelkoort (2015) o movimento *slow fashion* tem o intuito de questionar o

corrente processo industrial no universo da moda, buscando o envolvimento de um produto atemporal feito a partir de materiais duráveis interligados também à sustentabilidade.

Conforme apontam Harper e Graedel (2004), a ecologia industrial é uma ótima opção quando se fala em reduzir desperdícios industriais, de maneira a deixarmos de ver os materiais de forma linear (extração; processamento; uso; descarte), como vem ocorrendo em grande parte das cadeias de produção da sociedade moderna. O termo “ecologia industrial” surgiu como forte alternativa para alcançar o desenvolvimento sustentável. O conceito de ecologia industrial é definido por Frosch e Gallopoulos (1989) como um sistema em que “a energia e os materiais são otimizados, a geração de resíduos é minimizada e os efluentes de um processo [...] servem como matéria-prima para outra”. Os autores destacam que o sistema ecológico natural é extremamente semelhante ao sistema e estrutura industrial e/ou econômico, de maneira que, quando abordado de maneira consciente, pode ajudar a descobrir direções úteis para o desenvolvimento do sistema industrial.

Frosch (1992) já indicava a necessidade de mover o sistema na direção de minimizar a produção de resíduos e projetar os resíduos restantes de forma a facilitar a comercialização, reciclagem e reaproveitamento dos mesmos. Apontava que é preciso, também, encontrar incentivos para que seja mais fácil de reutilizar como materiais de entrada os materiais/produtos de fim de ciclo. Incluindo estes materiais, tanto resíduos quanto produtos em fim de vida, no sistema industrial como material ou como energia para novos produtos e/ou processos. Esta abordagem, como afirmam Harper e Graedel (2004), é a chamada simbiose industrial, que estuda os materiais e resíduos dentro do contexto de ecossistemas industriais. Esta conduta busca oferecer inúmeras possibilidades em relação à troca de materiais, resíduos, energia e água entre várias organizações com proximidade geográfica para, assim como a simbiose biológica, tornar estas relações benéficas para os envolvidos e contribuir para o meio ambiente.

Segundo El-Haggag (2017), o principal conceito de Ecologia Industrial é de resolver questões mantendo o crescimento econômico. O autor afirma que a adoção de três conceitos permite atingir tais objetivos. O primeiro conceito é Produção Mais Limpa, que visa evitar a geração de resíduos direto na fonte, através de técnicas de redução de resíduos, reciclagem e/ou modificação de processos. O segundo conceito é a própria Ecologia Industrial. Com base no conceito da Ecologia Industrial, vários Parques Eco Industriais foram desenvolvidos em que qualquer resíduo é reutilizado ou retratado para atingir o fluxo cíclico do material e evitar a geração de resíduos. O terceiro conceito é o Complexo Industrial Equilibrado Ambientalmente, projetado para localizar indústrias compatíveis próximas umas das outras que podem utilizar os resíduos uns dos outros. A principal vantagem de adotar esses conceitos é minimizar e/ou eliminar o custo da matéria-prima, transporte, armazenamento e

eliminação de resíduos e tratamento, gerando, também, benefícios econômicos aos envolvidos. Portanto, promove indústrias sustentáveis em uma sociedade sustentável.

Visando a reutilização de resíduos têxteis, tanto os sólidos industriais quanto os de descarte pós-consumo, entende-se que sua reutilização e aplicação para novos materiais é uma boa opção para mitigar os impactos causados pelo setor têxtil e confeccionista, bem como pelo consumo de moda. Materiais compósitos com matriz polimérica e fibras são boas opções para este tipo de reutilização, pois permitem o uso de diversos tecidos servindo como reforços ou cargas. Esta alternativa mostra-se viável, pois, ao reutilizar os resíduos têxteis como base para o novo material, economiza-se, assim, recursos naturais, gastos de energia para a produção e o descarte desnecessário de materiais, conforme visto em conceitos supracitados.

Diversos artigos científicos apontam que os materiais compósitos reforçados com fibras têm sido cada vez mais usados em vários componentes estruturais na indústria aeroespacial, setores de energia naval, automotiva e eólica (WAGNER, T. *et al.*, 2018; TOUMPANAKI, E. *et al.*, 2019; KORICHO, E. G.; BELINGARDI, G., 2015). Embora os custos de fabricação e investimento de materiais compósitos sejam altos quando comparados aos materiais convencionais (principalmente metais e suas ligas), sua maior resistência por unidade de peso e a necessidade de menos operações de usinagem e fixação necessárias aumentam a popularidade dos materiais compósitos no dia a dia.

Assarar *et al.* (2015) afirmam que os compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro, carbono e Kevlar apresentam um desenvolvimento continuamente crescente em inúmeras indústrias. Hoje, compósitos de polímero reforçado com fibras naturais estão surgindo porque são ecológicos, seus recursos são renováveis e considerados neutros em relação às emissões de CO₂.

Assim, devido às suas boas propriedades específicas, as fibras naturais podem constituir, em aplicações particulares, uma alternativa interessante para fibras de vidro, que levantam muitas questões ambientais devido ao importante consumo de energia e emissão de poluentes durante a fabricação. Monti *et al.* (2016) destacam que compósitos poliméricos reforçados com fibras de linho são particularmente interessantes, as fibras de linho exibem propriedades às vezes melhores do que as de fibras de vidro sintéticas. Sua microestrutura composta por camadas coaxiais reforçadas por microfibrilas orientadas conferem-lhes alta resistência mecânica e rigidez.

Ao se desenvolver um novo material compósito com os reforços de resíduos têxteis, percebe-se a necessidade de se obter maiores informações sobre suas propriedades físicas e mecânicas, informações que devem ser confiáveis e validadas. Cientificamente, os ensaios mecânicos de caracterização de materiais permitem o levantamento destes dados

necessários para aprofundar o conhecimento a respeito dos materiais, possibilitando-se, assim, uma melhor noção das suas possíveis aplicações em projetos de produtos.

A partir dos dados levantados nos ensaios mecânicos, é possível virtualizar o processo de ensaios mecânicos para os materiais com o uso das simulações numéricas, permitindo, assim, maior agilidade e baixo custo, facilitando a busca por aplicações em produtos de diversos tipos. Através dos ensaios virtuais, torna-se possível aplicar o material em diversos projetos e analisar seu desempenho sem a necessidade de prototipagem de um objeto físico, tornando o processo de avaliação de aplicações muito mais assertivo e econômico que os processos convencionais.

Uma das motivações desta pesquisa foi o trabalho de conclusão de curso de graduação do autor em Design de Produto pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde foi desenvolvida uma coleção de armações de óculos de sol com a utilização do material compósito laminado de resíduos têxteis. Neste trabalho o objetivo era a criação de modelos de armações e o processo produtivo que permitisse a aplicação deste material de forma a atender os requisitos necessários para armações funcionais. Nesta dissertação o autor volta-se ao material compósito para caracteriza-lo mecanicamente e, assim, realizar a seleção de materiais de maneira inversa e utilizar os dados para realização de simulações numéricas computacionais, de modo a levantar informações para novas aplicações em projetos de produtos.

1.2 Delimitações da pesquisa

Para a elaboração desta pesquisa, o autor optou por utilizar como resíduos têxteis apenas resíduos de denim, visto a possibilidade de utilização de diversos outros tecidos para compor o material compósito, e, assim, manter um padrão para a posterior análise em ensaios. Outro detalhe importante da delimitação referente ao material é a utilização de retalhos grandes (fibras longas), na medida em que se pode utilizar retalhos de diversos tamanhos e essas diferenças geram características diversas ao material compósito laminado.

Para a caracterização dos materiais foram realizados apenas ensaios mecânicos, e dentre os ensaios, apenas os necessários para uma caracterização satisfatória de um material compósito de matriz polimérica. Este estudo tem como foco levantar informações de seleção de materiais para serem utilizadas em projetos técnicos que envolvam o uso deste material e, assim, tornar possível a seleção de materiais similares para levantamento de possíveis aplicações do mesmo. As simulações numéricas foram realizadas para fins de abrir um caminho ainda inexplorado para este material compósito, onde são utilizados como objetos de estudos corpos de prova 3D semelhantes aos utilizados nos ensaios mecânicos

segundo as respectivas normas. Desta maneira foi possível estipular se o método utilizado na virtualização do material para simulações em escala macroscópica foi efetiva ou não, sendo possível replicá-la para outros objetos virtuais que possam servir de estudos para novas aplicações em projetos de produtos com o material compósito.

1.3 Problema de pesquisa

De acordo com o contexto explicitado no tópico anterior, estabeleceu-se o seguinte problema de pesquisa para esta dissertação:

Como a caracterização mecânica do compósito laminado de resíduos têxteis e matriz polimérica de epóxi pode auxiliar no processo de design de produtos com estes materiais?

1.4 Hipótese

Com a realização de ensaios mecânicos para caracterização do material compósito laminado de resíduos têxteis e matriz polimérica de epóxi, será possível, através da seleção de materiais similares juntamente com o uso de simulações numéricas, uma melhor aplicabilidade deste material em projetos de produtos. Este procedimento permite explorar diversas aplicações em produtos com um baixo custo de pesquisa e desenvolvimento, além de uma maior assertividade de desempenho em futuros projetos e, assim, reduzir o impacto negativo causado pelo descarte de resíduos têxteis.

1.5 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é **caracterizar (mecanicamente) o material compósito de forma a viabilizar simulações numéricas estruturais para o projeto de produtos.**

E os objetivos específicos que irão auxiliar na realização do objetivo geral são os seguintes:

- Compreender o contexto e as consequências geradas pelos resíduos têxteis para fins de identificar possíveis aplicações.
- Analisar características e funcionalidades de materiais compósitos de epóxi e fibras para levantamento de requisitos de projeto.

- Desenvolver protótipo do material compósito para realização dos ensaios.
- Aplicar ensaios mecânicos para caracterização do material compósito, analisar e sintetizar os resultados dos ensaios mecânicos para promover dados de entrada da simulação numérica.
- Aplicar e analisar os resultados das simulações numéricas do material.

1.6 Justificativa

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305/2010, as empresas são responsáveis, direta ou indiretamente, pela geração de resíduos sólidos e precisam elaborar seus Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Nestes planos deve-se informar como pretende-se destinar os resíduos gerados ao longo de seu processo produtivo (PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS, 2018). Além de tratar de questões relacionadas à sustentabilidade e diminuição de impactos ambientais gerados pelo setor têxtil e confeccionista, esta pesquisa trabalha com conceitos como a ecologia industrial e seus benefícios, revelando relevância social e econômica por tratar-se da reutilização de materiais que em grande parte são tratados como rejeitos e descartados em aterros sanitários.

Com a aplicação destes resíduos em novos materiais e produtos, entende-se que é possível gerar um impacto econômico e social positivo. Apesar de gerar um material de difícil reciclagem, por necessitar processos de separação química do tecido com epóxi, entende-se que o grande volume de utilização de resíduos têxteis em relação à quantidade de resina epóxi utilizada justifica esta iniciativa. Desta forma é viável reduzir o impacto na utilização de energia e recursos naturais como, por exemplo, a água empregada para produção e processamento das matérias-primas como o algodão, por estar ressignificando o material descartado e, assim, criando um novo ciclo de vida empregando-o em novos produtos que não necessitam um novo gasto da matéria-prima e energia.

Desta forma, esta pesquisa justifica-se ao sugerir novas aplicações para a utilização dos resíduos sólidos industriais têxteis, e ainda, ao passo que satisfaz a resolução da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), somando-se as possibilidades de intervir no ciclo de vida do tecido descartado, dando-lhe uma nova destinação, reaproveitando e possibilitando à evolução dos materiais em seus processos de produção através da ecologia industrial.

Outro fator que denota relevância para esta pesquisa é o próprio artefato gerado no decorrer do trabalho, artefato visto não apenas como o material compósito laminado de resíduos têxteis criado, mas sim como o método de criação, o modelo de caracterização e a instanciação de verificação através das simulações numéricas. Estes dados representam um pequeno avanço científico em virtude de se obter informações confiáveis e validadas a

respeito de um novo material compósito laminado. Abre-se, também, novos caminhos para utilização deste novo material compósito em projetos de produtos. Justifica-se frente a facilidade de exploração de novas possibilidades de maneira virtual, trazendo, assim, ganhos para a prática do design em futuros projetos de produtos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Visando uma melhor compreensão e buscando uma aplicação concisa no decorrer do projeto, faz-se necessário o aprofundamento na pesquisa de alguns temas fundamentais. Primeiramente são apresentados dados e definições referentes aos materiais compósitos de matriz polimérica e, também, sobre a utilização da resina epóxi. No segundo tópico é abordada a caracterização de materiais com foco em materiais compósitos e, principalmente, nos ensaios que são realizados nesta pesquisa. Em seguida é analisada a relação entre o design de produto e a seleção de materiais e, por fim, explora-se as simulações numéricas através da utilização do método dos elementos finitos (MEF), método no qual estão baseadas as simulações deste trabalho.

2.1 Materiais compósitos e resina epóxi

A definição de material compósito consiste, segundo a norma D3878-04A da American Society for Testing and Materials (ASTM), em uma substância constituída por dois ou mais materiais ou fases, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia com propriedades superiores que não se encontram nas respectivas matérias-primas isoladamente, atuando, desta forma, em sinergia.

Conforme apontam Castro; Francisquetti e Gasparin (2019), boa parte dos materiais compósitos são formados por apenas duas fases: nas quais uma é chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada frequentemente de reforço ou carga. A matriz é a fase contínua sendo responsável pela transferência de tensões e o reforço está distribuído na matriz, geralmente, é mais rígido e resistente do que a matriz.

Salerno (2013) cita que existem três escalas de observação de materiais compósitos: micro, meso e macroescala. Microescala considera a estrutura compósita heterogênea: a fibra, a interface matriz/fibra etc. A mesoescala define o laminado composto pela lâmina e interface associada. Por fim, a macroescala considera o comportamento global do compósito laminado.

Ao se obter materiais compósitos de matriz polimérica alguns aspectos fundamentais devem ser levados em consideração para que o resultado final do material seja satisfatório. A interação dos reforços no compósito não é apenas uma função da resistência à tração da fibra, do seu comprimento e da fração volumétrica desta no compósito, mas também depende da natureza química e da ligação física entre a fibra e a matriz polimérica. As interações entre fibras e matriz desempenham um papel fundamental na transferência de tensão da matriz

para a fibra. A ligação entre a fibra e a matriz é criada durante a fase de produção dos materiais compósitos.

A incompatibilidade de componentes é responsável por uma baixa aderência na interface fibra/matriz e baixa dispersão de fibras, o que causa uma diminuição das propriedades mecânicas desses materiais. Desta forma, como especificam Rodrigues; Souza e Fujiyam (2015), é primordial para entender como as principais variáveis de processamento de materiais compósitos de matriz polimérica são afetadas quando as fibras de vidro são substituídas por fibras naturais, que possuem estruturas diferentes, arquitetura de tecidos diferentes e interações químicas diferentes com as resinas utilizadas.

Uma das principais variáveis é a permeabilidade da fibra/tecido, que é o parâmetro chave que regula o fluxo da matriz no leito de fibras, juntamente com a viscosidade da resina. A permeabilidade dos tecidos é especialmente importante nas técnicas de injeção de baixa pressão, como infusão a vácuo (*Vacuum Infusion Process - VIP*), onde a formação de vazios e o tempo de injeção podem ser aumentados consideravelmente quando a permeabilidade diminui.

Ainda em seu artigo, Borsoi *et al.* (2011) afirmam que a incorporação de fibras de algodão, provenientes do processo de tecelagem em indústria têxtil, em matriz polimérica, torna-se uma alternativa para a reutilização desses resíduos. Mediante os resultados do estudo do trabalho desenvolvido no artigo, a incorporação de 20% de fibras de algodão se torna viável. Por consequência, a adição de 20% em massa de resíduos de fibras de algodão, que possui um custo zero, implica em uma economia de 20% de resina virgem de poliestireno. Além de gerar uma redução de consumo de resina virgem, os resíduos consumidos no processamento dos compósitos, não são dispostos em aterros, e dessa forma, eliminando os custos e impactos ambientais de disposição em aterros sanitários.

Assim, a utilização de resíduos da indústria têxtil reduz o custo do material compósito produzido e gera um aumento nas suas propriedades mecânicas e térmicas. Visto que, quanto maior for a razão volumétrica de resíduos têxteis no material compósito, maior será o impacto positivo gerado na sua reutilização. De acordo com de Nguyen *et al.* (2009) um material pode ser considerado ecológico quando possui as seguintes características: origem renovável, impacto ambiental mínimo durante o processo de fabricação do material, alta produtividade em uso, geração mínima de substâncias perigosas e passível de reciclagem. Conforme relatam os autores, para um material ser considerado ecológico não é necessário atender a todas as diretrizes citadas, mas o maior número possível.

Castro; Francisquetti e Gasparin (2019), explicam que entre os polímeros sintéticos a classificação mais simples se dá em função do ponto de fusão ou derretimento. Alguns polímeros podem ser derretidos, dessa maneira são classificados como termoplásticos e,

outros não possuem o ponto de derretimento, então são classificados em termofixos ou termorrígidos. Em comparação com as resinas termoplásticas, as termorrígidas são mais utilizadas em compósitos por vários fatores, como, por exemplo, possuírem maior facilidade de processamento, serem líquidas à temperatura ambiente - facilitando a molhabilidade dos reforços, bom balanço de propriedades e ampla variedade disponível.

Resinas poliésteres, vinil-ésteres e epóxis são alguns exemplos dessa classe de resinas. O custo das resinas termorrígidas é mais baixo em relação ao custo de resinas termoplásticas de desempenho similar. Os polímeros termorrígidos, geralmente, são mais duros e mais resistentes do que os polímeros termoplásticos, além de possuírem melhor estabilidade dimensional. Conforme explicam Cabral *et al.* (2018), as resinas epóxi são comumente utilizadas como matriz para materiais compósitos de polímeros termorrígidos. O grupo de resinas epóxi pertence a uma família de termorrígidos derivados do petróleo que não liberam produtos de reação durante a sua moldagem e possuem baixa contração durante o seu processamento. Estes fatos dão destaque para a resina epoxídica sobre as demais resinas termofixas, e acabam justificando sua aplicação difundida.

Como afirmam em seus estudos Nikafshara *et al.* (2017) e Songqi Ma (2013), a resina epóxi é uma das resinas termoendurecíveis mais importantes devido às suas propriedades mecânicas superiores e o éter diglicídico de bisfenol A (DGEBA), que representa mais de 90% dos precursores de epóxi no mundo, é de longe o monômero mais amplamente usado para formular redes de epóxi. O Bisfenol A comercial representa mais de 67% da massa molar do DGEBA e é amplamente dependente de recursos fósseis. Os estudos de Almeida e Monteiro (2013) apontam que as resinas epóxi constituem o grupo de polímeros termofixos mais usado como adesivos e matrizes em compósitos de alto desempenho, bem como formam uma das mais importantes classes de adesivos estruturais.

Em geral, essas resinas são empregadas sob as mais diversas solicitações mecânicas, que podem incluir situações nas quais o material é submetido a altas taxas de deformação, como as encontradas nas aplicações aeronáuticas e aeroespaciais. Conforme Cabral *et al.* (2018), é um material com boa resistência ao impacto, térmica e química, porém apresenta uma baixa resistência à fratura, o que é sua maior deficiência. A polaridade das hidroxilas alifáticas e dos grupamentos éteres que, constantemente, montam a cadeia da resina, e a rede do sistema após a polimerização, fazem com que essas resinas apresentem uma alta adesão. Por conta da polaridade destes grupos criam-se forças atrativas a molécula epoxídica em si e a superfície na qual é aplicada, por isso sua utilização como revestimento, adesivo e como matriz de compósitos.

A epóxi vem sendo muito empregada nas indústrias e em construções para reconstrução de estruturas de concreto, como material para revestimento, anticorrosivo,

manutenção de máquinas, e como modelos de estrutura. Particularmente, as resinas do tipo epóxi apresentam boas propriedades mecânicas, resistência química, baixa absorção de umidade, baixa porcentagem de contração e fácil processamento (Castro, Francisquetti e Gasparin, 2019).

Hoje em dia há um grande interesse no desenvolvimento de uma resina epóxi de base biológica ou ecologicamente correta para substituir o DGEBA convencional. Diversos estudos vêm sendo realizados e aplicados, porém ainda existe grande dificuldade em se adquirir produtos comerciais com esta tecnologia. Nikafshara *et al.* (2017) e Songqi Ma (2013) apontam que as resinas epóxi podem ser sintetizadas a partir de vários tipos de materiais de base biológica. O ácido ferúlico é um composto natural encontrado em vários recursos biológicos não comestíveis como farelo de trigo, polpa de beterraba e outros dióis de base biológica em condições moderadas. Outra opção dentre os vários materiais sustentáveis e renováveis propícios para a síntese de epóxi de base biológica, a lignina tem recebido muita atenção.

Depois da celulose, a lignina é o segundo material natural mais abundante do planeta. A lignina pode ser obtida de fibras de plantas a partir de diversos métodos de extração. Embora vários compostos possam ser produzidos a partir da lignina, a vanilina é o produto valioso mais conhecido. A vanilina é geralmente usada como aromatizante ou materiais químicos em áreas farmacêuticas, mas também pode ser usado como matéria-prima para sintetizar resina epóxi e a resina epóxi resultante de vanilina demonstra boas propriedades térmicas e mecânicas devido à presença do anel aromático em sua estrutura, apresentando resultados próximos e até superiores em ensaios mecânicos em relação à epóxi derivada do DGEBA. Possuindo origem de base biológica, os compósitos com matriz polimérica podem apresentar melhor desempenho ecológico e degradabilidade ambientalmente amigável como explanam Nguyen *et al.* (2009).

2.2 Caracterização de materiais

Projetos de engenharia e design requerem um vasto conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais a serem utilizados. Os critérios de especificação dos materiais impõem a realização dos ensaios através de métodos normalizados, visando levantar propriedades mecânicas dos mesmos e seu comportamento sob determinados esforços (GARCIA *et al.*, 2012).

Os ensaios mecânicos são métodos utilizados para medir uma série de fatores com o objetivo de entender o comportamento do material com que se trabalha. Isso é feito por meio da análise de suas propriedades mecânicas em várias condições de uso. O ensaio mecânico

é muito requisitado devido ao seu ótimo custo-benefício, sendo capaz de alinhar alto desempenho, com segurança e um baixo valor. Outra característica interessante desse método é que ele pode ser destrutivo ou não destrutivo, dependendo do tipo de resultado buscado. Algumas das condições de uso mais comuns envolvem temperaturas, tipo de cargas e sua frequência de aplicação, tempo de desgaste e deformabilidade, entre outras.

Segundo os artigos de Koricho e Belingardi (2015) e SUN *et al.* (2018) a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais compósitos de matrizes poliméricas com fibras, em geral, é feita por meio de testes mecânicos especificados pelas normas da ASTM. Para uma caracterização de material satisfatória os ensaios de tração (ASTM D3039), compressão (ASTM D695-10) e cisalhamento (ASTM D3518) devem ser realizados em pelo menos cinco corpos de provas em cada ensaio para determinar as propriedades de materiais laminados compósitos.

Conforme estipulado anteriormente, foram realizados apenas os ensaios necessários para a caracterização do material e levantamento dos dados para realizar as simulações numéricas. Desta forma, os ensaios mecânicos de tração e cisalhamento foram realizados de acordo com as respectivas normas padrões para materiais compósitos laminados de matriz polimérica. Os termos da matriz dependem apenas dos seguintes parâmetros mecânicos do material: módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson.

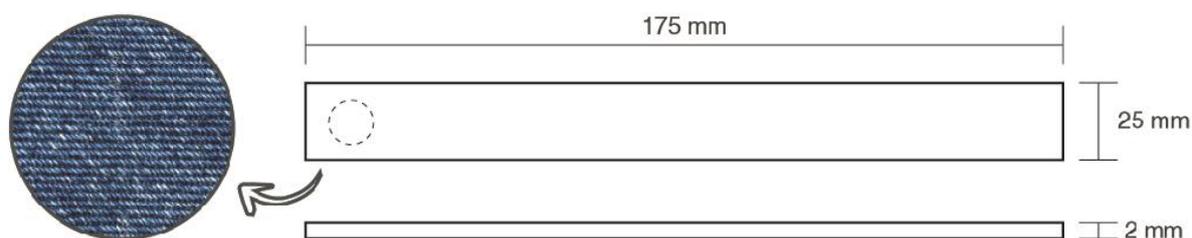
O ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em uma amostra específica (conforme a norma padronizada) até a sua ruptura. Os principais parâmetros mecânicos medidos pelo ensaio de tração são a resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade (Oliveira, 2015). A resistência à tração é avaliada pela carga aplicada por unidade de área no momento da ruptura. O alongamento representa aumento percentual do comprimento da peça sob tração, no momento da ruptura.

Quando um corpo de prova é submetido a um ensaio de tração, a máquina de ensaio fornece um gráfico que mostra as relações entre a força aplicada e as deformações ocorridas durante o ensaio, o qual é conhecido como gráfico tensão-deformação. O módulo de elasticidade ou módulo de Young é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do limite elástico, onde a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão. Na Figura 2 é possível observar como devem ser as dimensões dos corpos de prova de acordo com a norma de resistência à tração ASTM D3039.

Nos compósitos, o mecanismo de cisalhamento difere dos outros materiais devido à natureza heterogênea. Como o compósito é formado por mais de um material, em escala macroscópica, o cisalhamento é resultado da interação do material compósito com o esforço solicitante e do material matriz com o material disperso (ANCELOTTI JR, 2006). O ensaio de resistência ao cisalhamento planar em compósitos de matrizes poliméricas comumente utiliza

como referência a norma ASTM D3518, que é uma adaptação da norma de resistência à tração ASTM D3039.

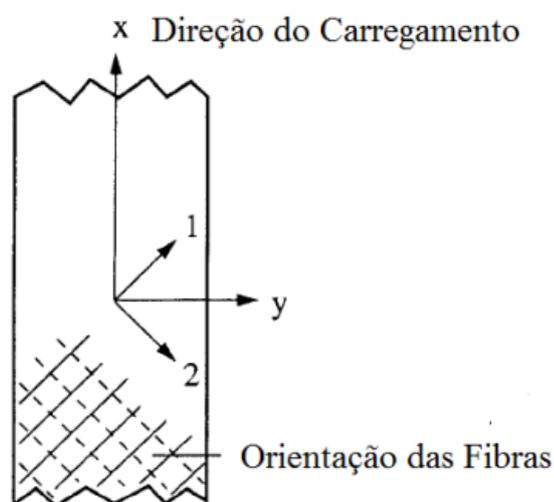
Figura 2 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Adaptado de ASTM D3039 (2002)

Como aponta Galvão (2012), o ensaio de cisalhamento planar utiliza os mesmos métodos e dispositivos de um ensaio de tração (sendo uma adaptação da norma ASTM D3039). No entanto, a principal diferença está na orientação das camadas do laminado a ser ensaiado, pois estas devem estar orientadas a $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo de aplicação da carga (Figura 3). As propriedades obtidas através da realização deste teste são predominantemente propriedades da matriz, uma vez que o reforço está orientado a $\pm 45^\circ$.

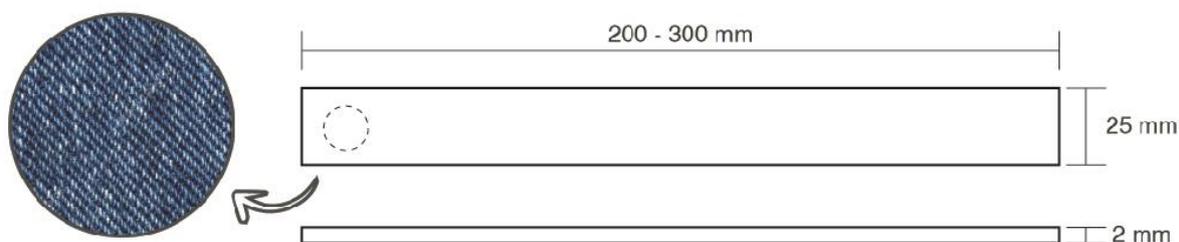
Figura 3 - Orientação das fibras para o ensaio de cisalhamento planar



Fonte: Adaptado de ASTM D3518 (2007)

Na Figura 4 é possível observar como devem ser as dimensões dos corpos de prova de acordo com a norma de resistência à tração ASTM D3518.

Figura 4 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento



Fonte: Adaptado de ASTM D3518 (2007)

De acordo com os artigos que abordavam o processo de caracterização de materiais (GARCIA *et al.*, 2012; SUN *et al.*, 2018; KORICHO E BELINGARDI, 2015), ficou clara a importância de manter um processo de produção dos corpos de prova preciso. Esta produção uniforme garante que os corpos de prova terão desempenhos similares, permitindo que os dados levantados sejam coerentes. As normas supracitadas disponibilizam medidas padrão dos corpos de provas para cada tipo de ensaio que será realizado. Com as informações dos resultados extraídos nos ensaios citados é possível estipular as propriedades mecânicas do material compósito de matriz epóxi e denim, que permitem alcançar os dados necessários para realizar uma simulação numérica satisfatória para este material.

2.3 Seleção de materiais e design de produtos

O encadeamento entre a Ciência e Engenharia de Materiais e o Design de Produtos, sendo que a primeira versa sobre substâncias capazes de serem convertidas em produtos e, a segunda, ocupa-se do projeto e desenvolvimento dos produtos, valida uma clara relação da Ciência e Engenharia de Materiais como fornecedora de subsídios para disciplinas projetuais como o Design de Produtos e engenharias. Em concordância aos conceitos apontados por um dos precursores na criação do curso de Ciência e Engenharia de Materiais (COHEN, 1974), partindo-se sob a perspectiva de inúmeras possibilidades de materiais, existe um grande número de processos de fabricação necessários para dar forma a estes materiais, formando inúmeras combinações de características, tem-se, assim, a indicação da melhor aplicação para um material.

Ao percorrer o caminho oposto, partindo-se de um produto que requer um conjunto de requisitos e propriedades que são viáveis através de determinadas formas e estruturas obtidas por certo processamento, faz-se necessário um sistema de atuação que permita explorar inúmeras combinações, selecionando deste contexto uma opção que cumpre com

maior eficiência possível os requisitos necessários ao produto. Ao conjunto destas sistemáticas dá-se o nome de Seleção de Materiais.

Os materiais, segundo a visão de Ashby e Johnson (2011), possuem dois papéis que se sobrepõem, tanto o de oportunizar a funcionalidade técnica de determinado produto quanto o de criar personalidade para o mesmo. Os autores elencam duas principais correntes de pensamento, sendo o “Projeto Técnico” a corrente com foco nos aspectos de design que tem em vista o melhor desempenho do produto, levando em consideração seu desempenho mecânico, durabilidade, custo, etc. Esta corrente está intimamente ligada aos atributos técnicos do produto, detalhando como ele é fabricado e o seu funcionamento. Já a corrente “Design Industrial” aborda perspectivas de projeto mais associadas às percepções sensoriais, como atributos visuais e táteis, por exemplo. Este viés demonstra uma melhor associação de atributos que possibilitem uma personalidade ao produto. A junção destas duas vertentes, segundo eles, é o “Design de Produto”, representando a síntese do projeto técnico e do design industrial na criação de produtos.

Como delimitado anteriormente, este estudo visa levantar dados do material para alavancar o Projeto Técnico de futuros produtos que o utilizem. Conforme os autores supracitados comentam, as propriedades do material derivam de análises estatísticas resultantes de ensaios de caracterização de materiais e estas propriedades fornecem uma base segura para o projeto técnico do produto, com foco na dimensão de engenharia. Uma vez que as propriedades são levantadas, se torna possível classificar o material de acordo com outros materiais que tenham perfis semelhantes em termos de atributos técnicos.

A seleção de materiais, em geral, parte de um produto ou idealização para, então, pesquisar e definir qual ou quais materiais atendem melhor ao projeto que está sendo desenvolvido. O presente estudo aborda a seleção de materiais com um foco inverso, a partir de um material, busca-se a pesquisa e definição de possíveis produtos que atendam o uso deste material compósito laminado de resíduos têxteis. Como as autoras Nejeliski *et al.* (2021) apontam em seu artigo, a seleção de materiais invertida ocorre quando o objetivo é buscar a introdução no mercado de um novo material ou de um material não convencional.

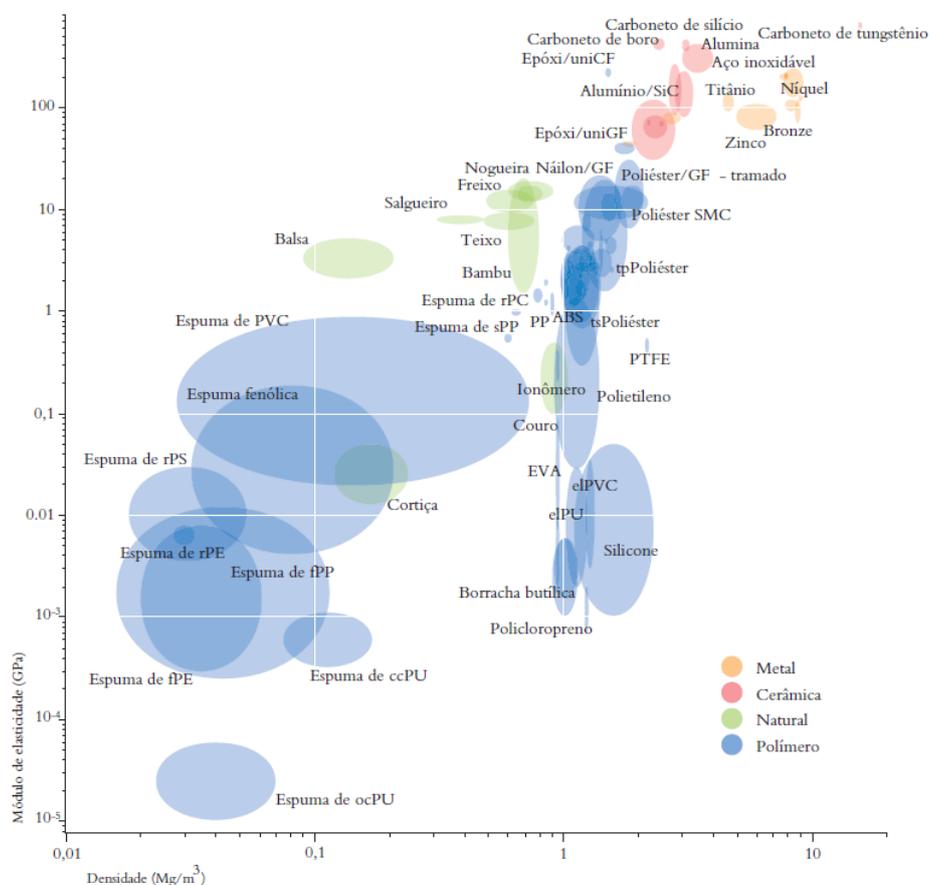
Seguindo o fluxo de seleção a partir do material que será utilizado, inicializa-se pela definição das principais propriedades técnicas, sucedendo a comparação com materiais convencionais com propriedades similares. Com estas informações, parte-se para a comparação com produtos que utilizam comumente os materiais similares aplicados e, assim, direcionar aplicações em diversos produtos possíveis.

Neste contexto, inúmeras pesquisas estão sendo realizadas para desenvolver novos materiais como soluções para reutilização de resíduos e a busca por novas alternativas de materiais com menor impacto ambiental. Indo ao encontro com as afirmações de Beylerian e

Dent (2007) de que uma das fontes mais ricas de inovação são os materiais e que eles podem promover o design inovador. Portanto, o domínio sobre materiais é notável para o processo de design de produtos, sendo necessário que o designer tenha grande conhecimento sobre eles para desenvolver projetos de produtos inovadores.

Uma boa alternativa para suportar esta seleção de materiais invertida é o uso do *software* CES Edupack (*Cambridge Engineering Selector*), atualmente chamado de Granta Edupack. É um *software* que permite, entre outras aplicações, a construção de Mapas de Propriedades de Materiais (MPM), procedimento criado pelo Professor da Universidade de Cambridge, Michael F. Ashby e implementado no *software* por Ashby e Cebon (1993). Os MPM permitem o cruzamento de uma ou mais propriedades em seus eixos, criando desta forma, gráficos que possibilitam a visualização dos materiais distribuídos segundo os valores das propriedades selecionadas, um exemplo é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Exemplo de Mapa de Propriedades de Materiais



Fonte: Adaptado de Ashby e Johnson (2011)

Este é um método polivalente que possibilita inúmeras abordagens, por exemplo: (1) seleção de materiais para aplicações específicas (ASHBY, 2000); (2) comparação e mudança

de materiais para redução de custos ou aumento de performances (GRANTA DESIGN, 2016); (3) seleção de processos de fabricação e materiais para os processos (ASHBY *et al.*, 2014); etc. Para esta pesquisa o uso consistiu em buscar materiais que apresentem propriedades semelhantes ao compósito laminado de resíduos têxteis e, assim, buscar áreas de aplicações potenciais com base nestes materiais similares.

2.4 Simulações numéricas

A simulação numérica computacional através da análise de elementos finitos mostra-se como uma técnica útil para caracterizar o comportamento mecânico de laminados compósitos em virtude de sua alta eficácia e baixo custo. Conforme os apontamentos de Luiz Vaz (2011), o método dos elementos finitos (MEF) foi desenvolvido em meados do século XX e, hoje, é uma das principais ferramentas utilizadas para a análise de problemas estruturais.

O MEF consiste na divisão de um modelo matemático em componentes descontínuos de geometria simples e conhecida, os chamados elementos finitos, que são interligados por nós situados em seu contorno. A esta subdivisão da estrutura em elementos, denomina-se malha. A discretização produz um número elevado de equações algébricas, que são geradas e resolvidas com o auxílio de computadores digitais. Assim, pode-se utilizar procedimentos padrões, aplicáveis aos sistemas discretos, que não envolvem decisões de engenharia durante o procedimento computacional. A resposta no interior de cada elemento é expressa em termos de funções de interpolação, que são dependentes dos deslocamentos nodais. Tem por base os conceitos dos métodos de energia e métodos aproximados, e pode ser usado para resolver tanto problemas de estruturas reticuladas, como também estruturas contínuas bi e tridimensionais.

Em seu estudo, Sartorato (2013) afirma que as teorias utilizadas para realizar as simulações numéricas através do MEF em materiais compósitos laminados surgiram inicialmente do estudo de placas e cascas isotrópicas (que apresentam propriedades físicas iguais em todas as direções), nas quais utilizam-se as mesmas hipóteses cinemáticas dessas teorias. Portanto, as referidas teorias foram adaptadas e/ou expandidas para os casos de materiais anisotrópicos (certas propriedades físicas como dureza, resistência mecânica, refração da luz, por exemplo, dependem da direção em que são medidas), ortotrópicos bi e tridimensionais (cujas propriedades mecânicas são únicas e dependem das direções em que são observadas) e estruturas laminadas. Atualmente, o estudo de elementos finitos e teorias de modelagem para materiais compósitos se baseia principalmente na utilização de cascas, devido à maior generalidade que essa modelagem acrescenta às formulações. As cascas (do

inglês, *Shells*), são definidas como estruturas nas quais uma de suas dimensões (espessura) é diversas ordens de grandeza menor que as outras duas.

Segundo os estudos de Qatu *et al.* (2010), as cascas são elementos intrinsecamente tridimensionais, todavia, devido à grande dificuldade em escrever as equações elásticas tridimensionais para as coordenadas de uma dada casca, verifica-se que a imensa maioria dos trabalhos encontrados na literatura reduz o problema da descrição geométrica de um corpo tridimensional para um corpo bidimensional. Desta forma, utilizando a descrição das cascas a partir de superfícies de referência, sendo as superfícies médias geralmente utilizadas. Os autores afirmam que existem diversas classificações entre as diferentes teorias de cascas laminadas, a primeira, e talvez mais importante classificação feita é a teoria de camada única, que modelam uma casca laminada como um único corpo homogeneizado (do inglês, *Equivalent Single Layer Theories*). Sobre as teorias de camada única, uma sub-classificação pode ser feita em relação ao estado de tensões sob o qual o laminado está submetido, podendo ser categorizado como:

- Estado plano de tensões (formulado para laminados finos);
- Estado de tensões quase-3D (para laminados espessos);
- Estado de tensões tridimensional (para modelos de maior complexidade), onde todos os componentes de tensão estão presentes.

Existem diversos programas comerciais que aplicam o método de elementos finitos, dentre eles, o programa ABAQUS CAE, que é utilizado neste trabalho para a realização das simulações numéricas. Este *software* possui grande aplicação em inúmeras áreas da engenharia e consiste em dois principais módulos: gráfico (composto pelo ABAQUS CAE e ABAQUS Viewer) e *solver* (composto pelo ABAQUS Standard e ABAQUS Explicit).

A biblioteca do ABAQUS dispõe de vários tipos de elementos finitos, tais como: elementos sólidos, de viga, de membrana, de casca, etc. Na categoria de elementos de casca, o *software* inclui três grupos: de Finalidade Geral, de Casca Espessa e de Casca Fina. Os elementos de casca de Finalidade Geral servem tanto para análise de Casca Espessa quanto Casca Fina e fornecem soluções de boa qualidade para a maioria das aplicações.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente capítulo tem como objetivo expor a estratégia de pesquisa utilizada para esta dissertação, assim como o método aplicado para o desenvolvimento dos objetivos apresentados no Capítulo 1. Partindo da definição inicial do tema e sua respectiva contextualização, houve a identificação e formulação do problema de pesquisa a ser abordado:

Como a caracterização mecânica do compósito laminado de resíduos têxteis e matriz polimérica de epóxi pode auxiliar no processo de design de produtos com estes materiais?

A partir do problema de pesquisa, levantou-se como hipótese central a possibilidade de que com a realização da caracterização mecânica do material compósito seria viável se obter, desta forma, dados de entrada para realizar a seleção de materiais similares e o levantamento de áreas de aplicação para o material, somando-se com a factibilidade de aplicar simulações numéricas em projetos de produtos futuros. Desta maneira, a integração deste artefato, visto como o material compósito, em projetos é facilitada, permitindo explorar possíveis aplicações com um baixo custo de pesquisa e desenvolvimento e, ainda, pode-se mensurar, de forma virtual, o desempenho deste novo artefato em desenvolvimento.

Uma compreensão geral de artefato em *Design Science Research* é que ele, segundo Johannesson e Perjons (2014), é um objeto feito por humanos com a intenção de ser usado para resolver um problema prático. Conceito que vai ao encontro com a definição de March e Smith (1995) em que este artefato pode se apresentar na forma de constructos, modelos, métodos ou instanciações, sempre com o propósito de resolver ou abordar um problema prático.

Simon (1996) afirma que para um artefato desempenhar um propósito, deve-se analisar o vínculo entre a finalidade, a natureza do artefato e o contexto em que ele vai operar. De acordo com a definição de Borgo e Vieu (2009), um artefato é um objeto físico que um agente (ou grupo de agentes) cria por, possivelmente, dois atos simultâneos intencionais: a seleção de uma entidade material (como seu constituinte) e a atribuição de uma qualidade ou capacidade técnica. Desta forma, pode-se reputar o artefato como um campo de interação entre a entidade material (ambiente interno) e o contexto onde ele irá operar (ambiente externo), como podemos observar na Figura 6.

Figura 6 - Artefato e seus ambientes



Fonte: Adaptado de (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015)

Como paradigma epistemológico, este trabalho se baseia nos conceitos fundamentais da *Design Science*, ou ciência do artificial. Diferente daquilo que é natural, o artificial é o que foi produzido ou desenvolvido pelo homem, como máquinas e organizações, com o objetivo de alterar uma situação de um estado corrente para um estado desejável (SIMON, 1996). Segundo os apontamentos de Dresch; Lacerda e Antunes Jr. (2015), a *Design Science* envolve-se com a produção de conhecimento orientado à solução de problemas através do projeto e desenvolvimento de artefatos que contribuam para uma melhor atuação humana, tanto para sociedade quanto para organizações. É o conhecimento construído a serviço da ação.

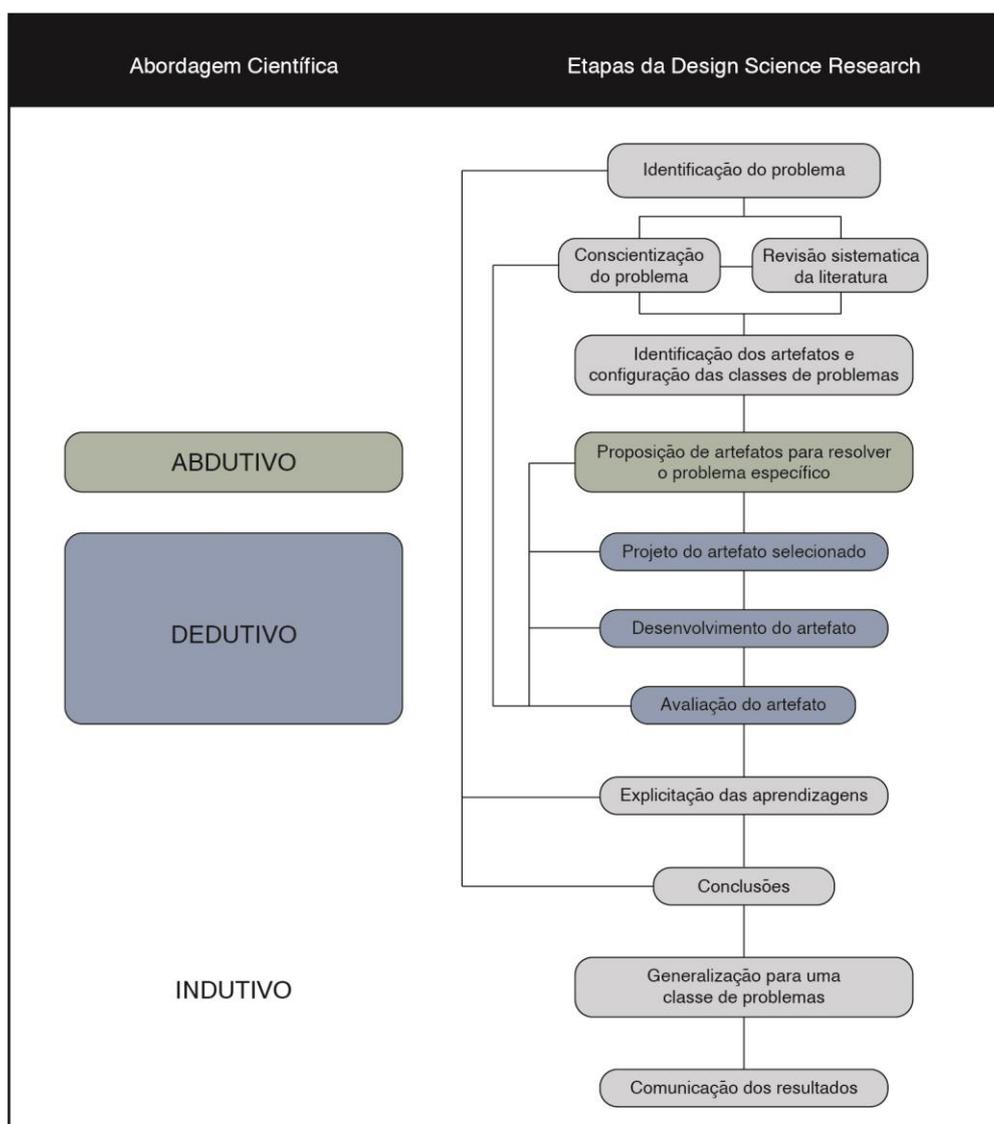
Quando o paradigma epistemológico é a *Design Science*, surge outro método de pesquisa, a *Design Science Research*. Diferente de outros métodos de pesquisa, este busca produzir conhecimento na forma de uma prescrição para apoiar a solução de um determinado problema real, ou um projeto, para construir um novo artefato (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015).

Portanto, a metodologia de pesquisa adotada para este trabalho foi a *Design Science Research* (DSR). Ela foi escolhida por visar realizar uma pesquisa prescritiva (ou construtiva) e propor um artefato que solucione um problema do mundo real e que contribua com o avanço teórico (HOLMSTROM; KETOKIVI; HAMERI, 2009). Ela ainda é um paradigma que resolve problemas do mundo real que cria inovações que definem ideias, mas que não são isentas

de leis naturais e teorias de comportamentos. Como Hevner (2007) afirma em seu trabalho, esta é uma metodologia que cria e avalia artefatos que pretendem resolver problemas operacionais. A escolha ocorreu levando em consideração que um dos fatores que asseguram o rigor metodológico e a confiabilidade dos resultados de uma pesquisa é através da utilização de métodos e ferramentas que estejam nivelados com a natureza do problema.

Dresch; Lacerda e Antunes Jr. (2015) apresentam uma proposta de etapas para uma pesquisa baseada em DSR fundamentada em metodologias utilizadas em diversos trabalhos baseados em *Design Science*, como pode ser observado na Figura 7.

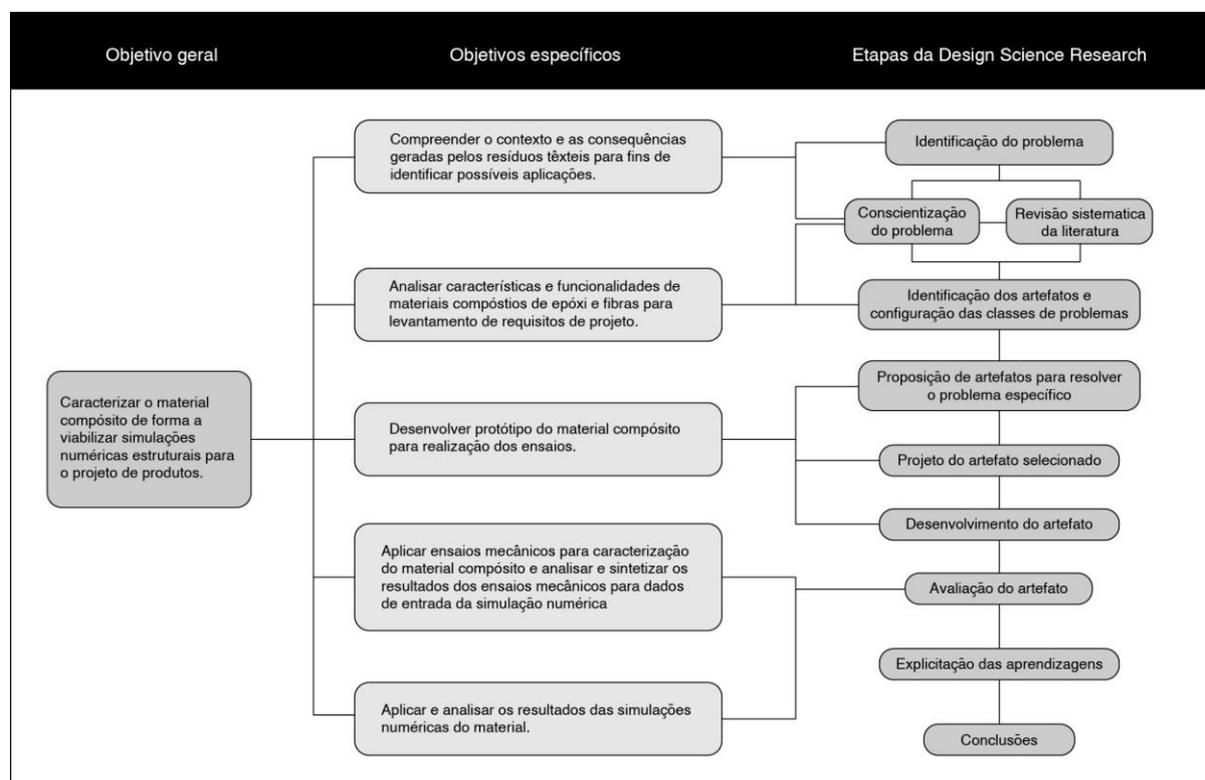
Figura 7 - Etapas da design science research



Fonte: Adaptado de (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015)

A partir da definição do objetivo geral desta pesquisa, foram definidos os objetivos específicos como objetivos suportes para que se possa atingir o propósito desta pesquisa. Desta forma, é possível observar na Figura 8 o desenho estrutural de desenvolvimento da pesquisa e como as etapas da DSR se relacionam com os objetivos propostos neste trabalho.

Figura 8 - Estrutura de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro objetivo específico está diretamente relacionado a um levantamento e compreensão geral do tema em que se insere este trabalho:

Compreender o contexto e as consequências geradas pelos resíduos têxteis para fins de identificar possíveis aplicações.

Seguindo a estratégia da DSR, as etapas de identificação e conscientização do problema permitiram alcançar a compreensão geral do contexto desta pesquisa através do levantamento de dados para elucidar os problemas referentes ao descarte de resíduos do setor têxtil e confeccionista brasileiro. Estas informações, conforme apresentadas no capítulo de introdução, foram extraídas das principais associações, organizações e iniciativas de

projetos que tragam uma maior sustentabilidade para este setor tão expoente no Brasil e no mundo.

A etapa de revisão sistemática da literatura (RSL), abordou os pontos principais para que se pudesse mensurar a viabilidade da hipótese central deste trabalho. Conforto *et al.*, (2011) apontam que a RSL se apresenta como uma ótima ferramenta científica para contribuir no processo de criar um embasamento teórico-científico, o estado da arte, de determinado assunto, buscando - de forma sistemática - coletar, conhecer, compreender, analisar e avaliar um conjunto de artigos científicos relacionados ao assunto.

O tema em questão, para esta RSL, trata de materiais compósitos, os processos para caracterização destes materiais e simulação numérica computacional. Como o material em desenvolvimento é um compósito de matriz polimérica em resina epóxi com resíduos têxteis de denim é algo muito específico, a busca mais genérica se fez necessária para levantar informações relevantes em trabalhos similares que possam contribuir positivamente para a evolução deste estudo.

Segundo Lakatos (2010) a investigação nasce de algum problema, ele dirá o que é ou não relevante observar e quais dados devem ser selecionados. A delimitação do tema e a consequente elaboração do problema de pesquisa a ser explorado, foram o ponto de partida para a revisão sistemática, resultando nas questões de pesquisa para a RSL:

- Como é feita a caracterização/identificação de materiais compósitos?
- Quais as características/propriedades de materiais compósitos de resina epóxi e tecidos?
- Como funciona a simulação numérica computacional com materiais compósitos de matriz polimérica com fibras?

O principal objetivo desta RSL é o de levantar dados científicos para elucidar as principais questões de pesquisa levantadas anteriormente. Por consequência, os objetivos secundários são os de identificar o estado da arte em relação a este tema e complementar a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Para o segundo objetivo específico desta pesquisa:

Analisar características e funcionalidades de materiais compósitos de epóxi e fibras para levantamento de requisitos de projeto.

Ao longo da análise dos artigos finais selecionados na RSL, foi possível levantar uma série de dados a respeito de materiais compósitos de epóxi e fibras que serviram de parâmetro norteador para o desenvolvimento deste trabalho em alguns aspectos,

principalmente os com uso de fibras de linho em sua composição por apresentarem algumas características semelhantes às fibras de algodão do tecido de denim. Sendo assim, a etapa de identificação dos artefatos similares e sua consequente análise, bem como a configuração da classe de problemas, foram baseadas nos resultados obtidos ao final da revisão da literatura, valendo-se das lições e técnicas aplicadas em outros estudos similares.

As três etapas seguintes da DSR referem-se ao terceiro objetivo específico:

Desenvolver protótipo do material compósito para realização dos ensaios.

Servindo como base teórico-metodológica, as análises de similares e a revisão sistemática da literatura subsidiam, com seus levantamentos de dados, as demais etapas do processo a percorrer nesta metodologia. A proposição de artefatos deve ocorrer levando-se em consideração, principalmente, o contexto de atuação e a sua viabilidade. Nesta etapa ocorre o uso do raciocínio abduutivo ou, ainda, método abduutivo, elemento central da *Design Science*, que segundo os conceitos referidos por Dresch; Lacerda e Antunes Jr. (2015), é um processo criativo que estuda fatos e propõe uma teoria para explicá-los (criação de hipóteses), sendo o único método científico que oportuniza a introdução de uma nova ideia.

Na etapa de projeto do artefato, seleciona-se uma proposição de artefato, de maneira a levar-se em consideração suas características de ambiente interno e externo. Também deve-se descrever todos os procedimentos de construção e avaliação deste artefato em questão, garantindo o rigor metodológico e permitindo que outros estudos possam replicar e confirmar os dados. No desenvolvimento do artefato documenta-se as abordagens utilizadas na construção de seu ambiente interno, levando em conta processos, materiais, montagens, etc.

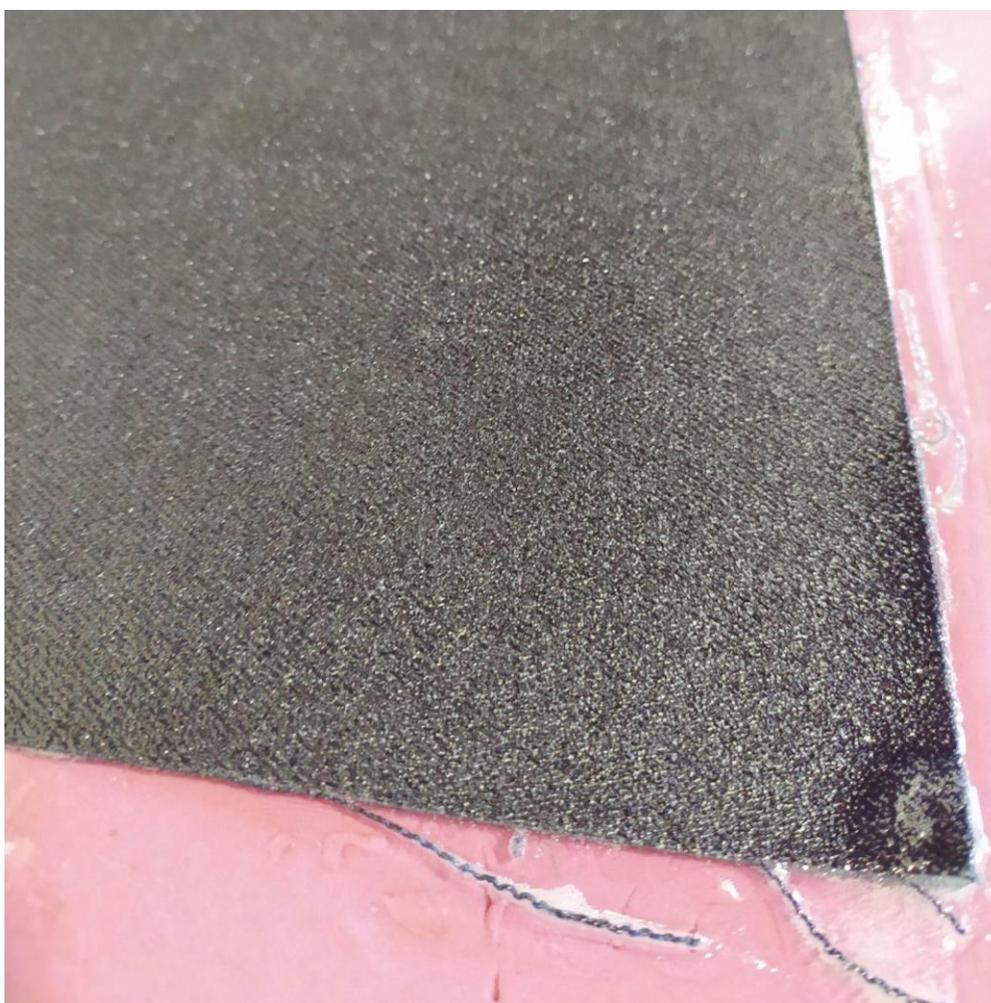
Para a produção dos corpos de prova o método utilizado foi o processo de moldagem por compressão com a utilização de uma prensa manual. Para isto, foi produzido um molde retangular simples feito em material PVC semi-rígido, moldado em termoformagem a vácuo nas dimensões de 300 x 220 x 2 (mm). Antes de receber o material compósito, o molde foi previamente preparado com desmoldante em spray de silicone para, desta forma, facilitar o processo de desmoldagem da placa dos corpos de prova.

O molde foi preenchido com três camadas de retalhos de tecido denim 100% algodão que foram adquiridos no Banco de Tecido de Porto Alegre, as peças foram cortadas nas dimensões do molde (300 x 220 mm) para garantir as fibras contínuas na composição do material. A preparação dos tecidos consistiu em anteriormente lavar e secagem ao sol e, momentos antes da aplicação da resina, as peças foram secas em estufa a 50°C e passadas

a ferro quente para retirar o máximo de umidade e garantir que o tecido estivesse completamente plano no momento da aplicação da resina. Cada camada de tecido foi molhada com a resina epóxi de baixa viscosidade derivada de petróleo, esta resina é produzida pela Maxepoxi Industrial e Comercial Ltda. e distribuída sob o nome comercial de Resina Mar RT - A*.

O processo para a molhabilidade do tecido consistiu em aplicar a resina em cada camada de tecido e, com o auxílio de uma espátula, espalhou-se a resina até que o tecido estivesse completamente impregnado, como pode-se observar na Figura 9. É notável a maior proporção no uso de tecido em volume em relação ao uso de resina e a proporção em peso de tecido foi de 75 g para 120 g de resina epóxi em cada chapa, resultando em um percentual de 38,5% em peso de tecido na constituição do material compósito laminado de resíduos têxteis.

Figura 9 - Impregnação do tecido com a matriz epóxi



Fonte: Elaborado pelo autor

O ciclo de moldagem por compressão foi de 12h em estufa com temperatura de 40°C a 45°C, mantendo-se sempre a mesma força de compressão. Após a desmoldagem, foi realizado o procedimento de pós-cura, ocorrido em forno com temperatura de 90°C por 4 h. Os materiais e processo de produção foram os mesmo para a fabricação dos corpos de prova para o ensaio de tração e para o ensaio de cisalhamento, a única diferença constituiu na orientação das fibras do tecido denim para $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo de aplicação do ensaio de cisalhamento.

Os corpos de prova foram cortados das placas do compósito em máquina de corte a laser da marca Katto Laser modelo 1625 com os parâmetros de laser 130 W, potência de corte 35% e velocidade 15 mm/s, os corpos foram cortados conforme as especificações dimensionais das respectivas normas supracitadas.

O quarto objetivo específico refere-se a:

Aplicar ensaios mecânicos para caracterização do material compósito, analisar e sintetizar os resultados dos ensaios mecânicos para promover dados de entrada da simulação numérica.

Etapa onde é realizada a avaliação do artefato, podendo ser conduzida em ambiente experimental ou em um contexto real. Esta avaliação tem como finalidade levantar dados de sua relação com o ambiente externo, apontando seus limites e condições de uso dentro do contexto que será operado.

Com os corpos de prova cortados, o ensaio de tração foi realizado na maquetaria da Faculdade de Arquitetura da UFRGS em uma Máquina Universal de Ensaio Shimadzu com capacidade de até 5kN e velocidade de 2 mm/min atendendo aos critérios especificados pela respectiva norma ASTM D3039. Foram realizados cinco testes para que o levantamento de dados para o material compósito seja consistente e se possa fazer a média dos valores obtidos com maior assertividade nos resultados.

O ensaio de cisalhamento do material foi realizado no laboratório LAPOL da UFRGS, laboratório com foco em materiais poliméricos. Os testes ocorreram em um equipamento Instron 3382 contando com vídeo extensômetro, os ensaios foram realizados com a velocidade constante de 2 mm/min e seguiram as demais especificações da norma ASTM D3518, seguindo a mesma lógica aplicada no ensaio de tração em relação a quantidade de testes e cálculo de médias dos resultados.

A análise dos resultados e cálculos necessários foram feitos através dos gráficos e dados numéricos gerados para cada corpo de prova, de onde foram retiradas informações para se obter o módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e o coeficiente de poisson

do material, informações imprescindíveis para a virtualização do processo através das simulações numéricas.

Com o levantamento das propriedades mecânicas do material compósito laminado de resíduos têxteis em matriz polimérica, foram realizadas, no FabLab da Unisinos POA, algumas análises no *software* Granta Edupack 2021-R1 versão educacional. Utilizou-se como dados de entrada do material, nomeado como Material Compósito Laminado de Resíduos Têxteis e Epóxi (MCLRTE), as propriedades e respectivos valores apresentados na Figura 10.

Estas análises possibilitaram uma seleção de materiais que apresentam propriedades mecânicas semelhantes e, assim, visualizar possibilidades de aplicações para o material em estudo. Foram criados os Mapas ou Diagramas de Ashby, que permitiram cruzar propriedades e gerar, graficamente, mapas de materiais que apresentem valores próximos das características em questão, facilitando a seleção de materiais semelhantes e, assim, encontrar aplicações comuns de cada material selecionado no mapa.

Figura 10 - Dados de entrada do material no software Granta Edupack

MCLRTE			
Datasheet view: All attributes		Show/Hide	Find Similar
My records >			
Composition overview			
Material family			Composite (polymer matrix)
Mechanical properties			
Young's modulus		2,11	GPa
Tensile strength		46,3	MPa
Elongation		10,7	% strain
Shear modulus		2,75	GPa
Poisson's ratio		0,41	

Fonte: Adaptado de Granta Edupack 2021-R1

A partir disso, foram criados quatro Mapas de Propriedades de Materiais cruzando os eixos de propriedades conforme descrito na Quadro 2. Desta forma, foi constituída uma listagem de materiais com performance semelhante ao compósito de resíduos têxteis, indicando, em princípio, quais aplicações podem ser viáveis de acordo com a similaridade aos demais materiais.

Quadro 2 - Mapas de propriedades de materiais

Mapa	Eixo X	Eixo Y
MPM1	Alongamento (Tensão %)	Resistência à Tração
MPM2	Módulo de Young	Resistência à Tração
MPM3	Coefficiente de Poisson	Resistência à Tração
MPM4	Módulo de Young	Coefficiente de Poisson

Fonte: Elaborado pelo autor

O quinto e último objetivo específico está relacionado com a virtualização do artefato e do processo de análise:

Aplicar e analisar os resultados das simulações numéricas do material.

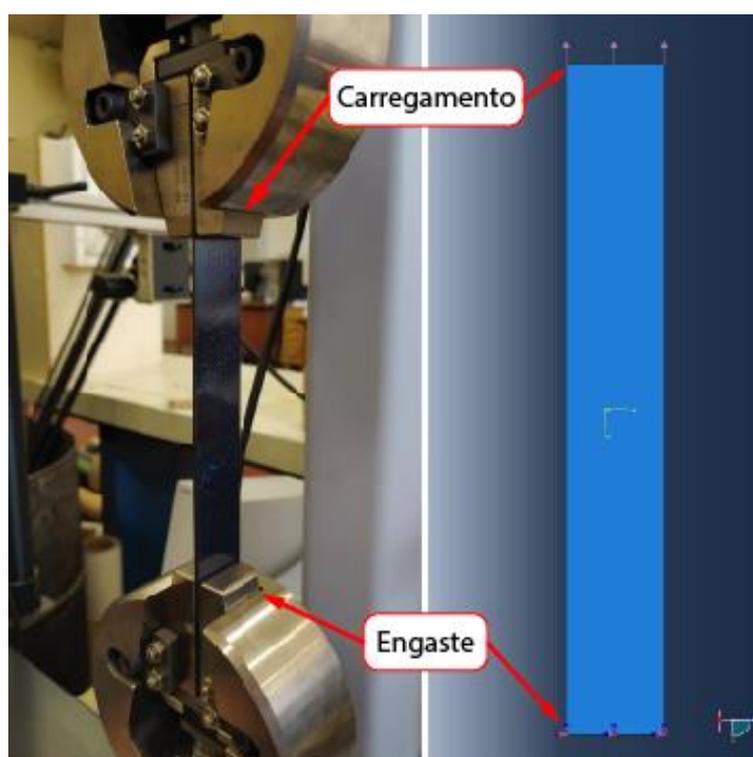
Apesar de estar na mesma etapa de análise, este objetivo depende dos resultados obtidos anteriormente no quarto objetivo específico. Esta avaliação ocorre de maneira virtual com dados numéricos referentes ao ambiente interno do artefato virtual (modelagem numérica do material) e do ambiente externo.

O processo de simulação possui algumas etapas globais a serem cumpridas para garantir seu êxito. De maneira geral, o processo parte da identificação do fenômeno a ser investigado e a posterior definição dos objetivos da simulação. Após a obtenção dos dados reais, elaboram-se o modelo para a simulação e realização da simulação. Por último, é feita a comparação do modelo conceitual com a realidade para validação do mesmo.

A aplicação das simulações numéricas foi realizada com a utilização do *software* ABAQUS CAE, empregando o método de elementos finitos para Cascas. Dentro do grupo de Cascas, optou-se pelo grupo de Finalidade Geral para a realização dos ensaios virtuais, sendo a peça um objeto 3D deformável e plano com as mesmas dimensões do corpo de prova do ensaio de tração (175mm x 25mm x 2mm). Para as propriedades do material, optou-se pela categoria de comportamento mecânico elástico do tipo lâmina, onde foram inseridos os dados referentes ao módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson.

A seção do corpo de prova virtual foi categorizada como casca homogênea com a espessura de 2mm. O procedimento de análise foi configurado como estático geral, por se tratar de uma simulação apenas da fase elástica do material. O carregamento de forças para a simulação foi configurado na categoria mecânica de *Edge Load* para representar a tração, esta é uma força distribuída ao longo de uma das arestas de largura do corpo de prova do ensaio virtual. Os carregamentos foram realizados no sentido longitudinal ao corpo de prova com forças de 10, 20 e 30 N/mm (valores contidos na fase elástica do ensaio de tração) e a outra aresta foi engastada, como pode-se observar na Figura 11.

Figura 11 - Comparação corpo de prova físico e modelo virtual



Fonte: Elaborado pelo autor

A malha de elementos finitos da peça foi composta pelo elemento do tipo S4R e contou com 972 nós, representando um total de 880 elementos. O elemento S4R é um elemento finito robusto e de uso geral, sendo adequado a uma ampla gama de aplicações. Seu formato é quadrilátero linear de casca com 4 nós e possui aplicações em teorias de cisalhamento flexível de cascas e teoria clássica para cascas finas.

Com o auxílio do *software*, foi simulado numericamente o ensaio de tração (fase elástica) para que se possa comparar com os resultados originais e, assim, validar o processo de simulação numérica para o material compósito laminado de resíduos têxteis e matriz epóxi.

As duas últimas etapas da DSR, embora não estejam diretamente ligadas a um objetivo específico, são responsáveis pelo fechamento da presente pesquisa. Durante a etapa de explicitação das aprendizagens serão expostos, na seção 4, os resultados mais relevantes deste trabalho.

Deste modo, são explicitados os fatores de sucesso e insucesso ao longo da pesquisa, de forma a assegurar que este trabalho possa servir de referência e como dados para geração de conhecimento prático e/ou teórico, bem como a validação ou não do artefato como o método aplicado para apoio ao projeto de produtos com materiais não convencionais através da caracterização, seleção de materiais similares e possíveis áreas de aplicações e o modelo de material para simulações numéricas. Na última etapa do método, na seção de conclusões, são apontadas as percepções gerais do autor em relação à pesquisa e suas limitações, bem como a possibilidade de direcionar pesquisas futuras e novos problemas que possam ser estudados nesta temática.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção é dedicada a apresentação dos resultados e discussões desta pesquisa, de forma a explicitar e registrar os principais resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

4.1 Revisão sistemática da literatura

Seguindo as diretrizes criadas para condução desta RSL, apresentadas anteriormente no capítulo de procedimentos metodológicos, após alguns testes e adaptações da string inicial, estabeleceu-se as palavras-chave que referenciam as questões de pesquisa a serem exploradas: ("epoxy matrix" OR "epoxy resin") AND ("textile" OR "fabric") AND ("material characterization" OR "material identification") AND ("mathematical simulation" OR "numerical methods" OR "numerical optimization").

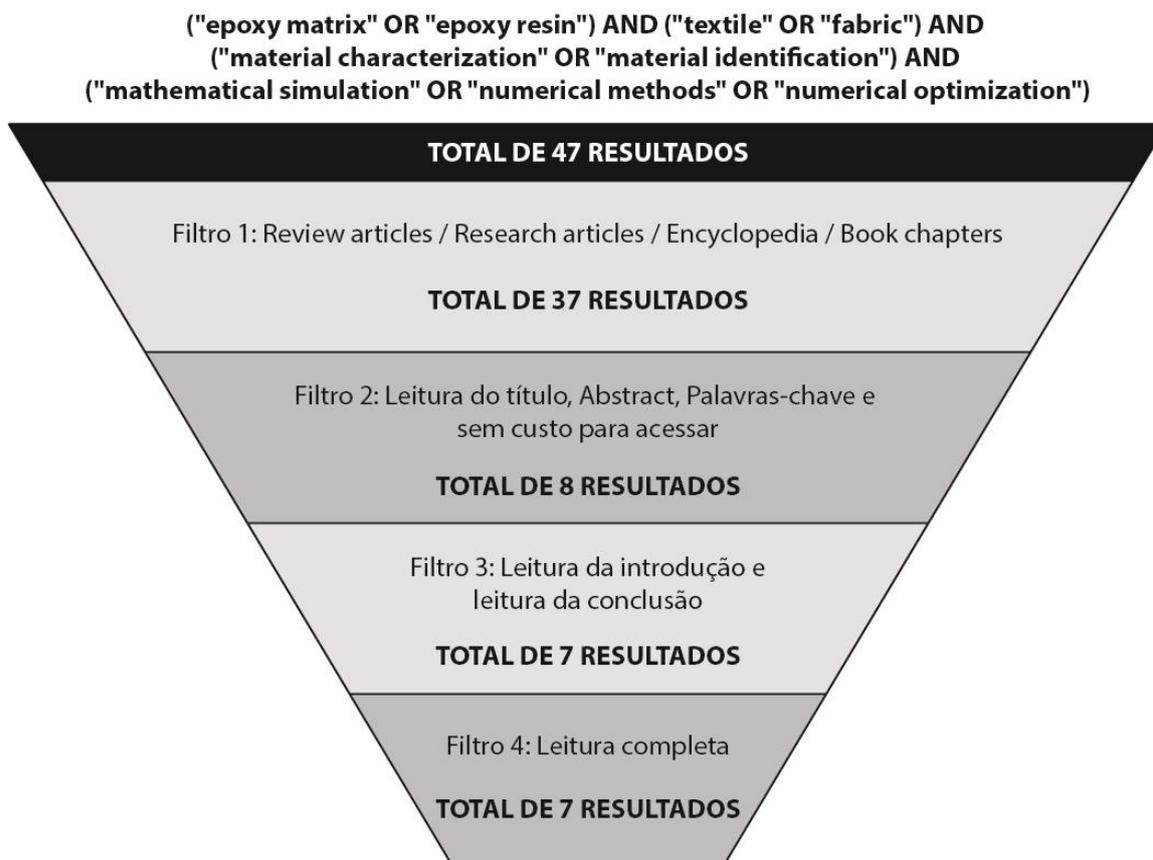
Para as fontes de buscas desta pesquisa, utilizaram-se as bases de dados de acesso remoto através da utilização de login pela plataforma da UFRGS, permitindo maior acesso ao conteúdo. As bases utilizadas foram a Scopus (<https://www.scopus.com>) e ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com>).

O principal critério de inclusão ou exclusão para esta RSL é de os artigos estarem alinhados com os objetivos estabelecidos para esta revisão. Ao longo dos filtros de seleção, os artigos que não apresentarem informações relevantes dos assuntos de interesse serão excluídos juntamente com artigos repetidos e artigos que não estão disponíveis gratuitamente ou na íntegra.

A Figura 12 ilustra o processo de operacionalização realizado para a base de dados ScienceDirect, mostrando quais foram os filtros aplicados e os respectivos resultados obtidos em cada uma das etapas de filtragem dos artigos.

O processo de operacionalização começou com o total de 47 artigos selecionados e após a aplicação do primeiro filtro (onde foram descartados artigos de revisão e de pesquisa, capítulos de livros e enciclopédias) restaram 37 resultados para o filtro 2. No segundo filtro foram selecionados 8 artigos após a leitura do título, resumo e palavras-chave, restando 7 trabalhos para a leitura de introdução e conclusão na terceira etapa de filtros. Ao final do processo de filtragem dos artigos encontrados a partir da string de busca utilizada nesta base de dados restaram, no total, 7 trabalhos para a leitura completa e análise das informações.

Figura 12 - Operacionalização ScienceDirect



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 13 é possível observar o processo de operacionalização realizado para a base de dados Scopus, mostrando quais os filtros aplicados e os resultados obtidos em cada etapa deste processo de filtragem.

O processo de operacionalização começou com o total de 38 artigos selecionados e após a aplicação do primeiro filtro, onde foram descartados os artigos de revisão e de pesquisa, capítulos de livros e enciclopédias, restaram 32 resultados para aplicação do segundo filtro. No segundo filtro foram selecionados 10 resultados após a leitura do título, resumo e palavras-chave, restando 5 trabalhos para a leitura de introdução e conclusão na terceira etapa de filtros.

Figura 13 - Operacionalização Scopus



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao final do processo de filtragem desta base de dados restaram 5 artigos para a leitura completa e análise das informações, e ao final de todo o processo de operacionalização da RSL restaram, no total, 12 artigos científicos para a leitura completa, análise e síntese dos resultados. O Quadro 3 apresenta os artigos finais analisados neste trabalho.

Quadro 3 - Artigos finais RSL

(continua)

Artigo	Autor	Título do trabalho	Base de dados
A 01	KORICHO; BELINGARDI, 2015	An experimental and finite element study of the transverse bending behaviour of CFRP composite T-joints in vehicle structures	Elsevier

Quadro 3 – Artigos finais RSL

(continuação)

Artigo	Autor	Título do trabalho	Base de dados
A 02	WAGNER <i>et al.</i> , 2018	Experimental and numerical assessment of aerospace grade composites based on high-velocity impact experiments	Elsevier
A 03	GIRARD <i>et al.</i> , 2018	Experimental and numerical characterization of thin woven composites used in printed circuit boards for high frequency applications	Elsevier
A 04	HENNING <i>et al.</i> , 2018	Fast processing and continuous simulation of automotive structural composite components	Elsevier
A 05	SUN <i>et al.</i> , 2018	Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers	Elsevier
A 06	HOFER <i>et al.</i> , 2019	Multiscale modeling of the viscoelastic response of braid-reinforced polymers: Model formulation and experimental assessment considering different rheological models	Elsevier
A 07	SLISERIS <i>et al.</i> , 2015	Numerical modelling of flax short fibre reinforced and flax fibre fabric reinforced polymer composites	Elsevier
A 08	TOUMPANAKI <i>et al.</i> , 2019	Effect of internal moisture content and dynamic mechanical analysis testing conditions on the Tg values of CFRP tendons	Elsevier
A 09	GERLACH <i>et al.</i> , 2011	In-plane and through-thickness properties, failure modes, damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading	Elsevier

Quadro 3 – Artigos finais RSL

(conclusão)

Artigo	Autor	Título do trabalho	Base de dados
A 10	AUDIBERT <i>et al.</i> , 2018	Mechanical characterization and damage mechanism of a new flax-Kevlar hybrid/epoxy composite	Elsevier
A 11	SVANBERG; HOLMBERG, 2004	Prediction of shape distortions Part I. FE-implementation of a path dependent constitutive model	Elsevier
A 12	WEITZENBÖCK <i>et al.</i> , 1999	Radial flow permeability measurement. Part A: Theory	Elsevier

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a leitura completa foram selecionados sete artigos com maior potencial de responder às questões de pesquisa levantadas anteriormente. Segundo Ellwanger, Silva e Campos (2014) na fase de análise e síntese, os trabalhos significativos são analisados, em profundidade, a fim de retratar como os trabalhos selecionados respondem às questões de pesquisa, retomando o objetivo da revisão.

A seguir, serão apresentados os resultados encontrados durante a RSL que serviram de referência ao longo da pesquisa e, também, de base para responder às questões de pesquisa levantadas para a revisão.

Questão 1: Como é feita a caracterização/identificação de materiais compósitos?

De acordo com os artigos [A01] e [A05] a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais compósitos de matrizes poliméricas com fibras, em geral, é feita por meio de testes mecânicos especificados pelas normas da American Society for Testing and Materials (ASTM). Para uma caracterização de material satisfatória os ensaios de tração (ASTM D3039), compressão (ASTM D695-10), cisalhamento (ASTM D3518), compressão compacta e tração compacta (ASTM E399) devem ser realizados em pelo menos cinco corpos de provas em cada ensaio para determinar as propriedades de materiais laminados compostos.

De acordo com os artigos que abordavam o processo de caracterização de materiais, ficou clara a importância de manter um processo de produção dos corpos de prova preciso. Esta produção uniforme garante que os corpos de prova terão desempenhos similares,

permitindo que os dados levantados sejam coerentes. As normas supracitadas disponibilizam medidas padrão dos corpos de provas para cada tipo de ensaio que será realizado.

Com as informações dos resultados extraídos nos ensaios citados é possível estipular as propriedades mecânicas do material compósito de matriz epóxi e denim, que permitem alcançar os dados necessários para realizar uma simulação numérica satisfatória para este material.

Questão 2: Quais as características/propriedades de materiais compósitos de resina epóxi e tecidos?

Dos artigos pesquisados, a imensa maioria trabalhava com informações de compósitos de epóxi com tecidos de fibra de carbono, fibra de vidro ou kevlar, porém um dos artigos utilizou o tecido de linho em sua pesquisa. Pelo fato de o tecido de linho apresentar características mais próximas ao denim, o artigo [A07] foi usado como referência para responder a este problema de pesquisa.

Segundo os autores, para compósitos poliméricos reforçados com tecido de linho, vários estudos de modelagem numérica podem ser encontrados na literatura, estes artigos de referência entram como busca cruzada para serem analisados posteriormente. Na Tabela 2 é possível observar algumas propriedades dos componentes do material compósito de epóxi e tecido de linho apresentadas pelos autores.

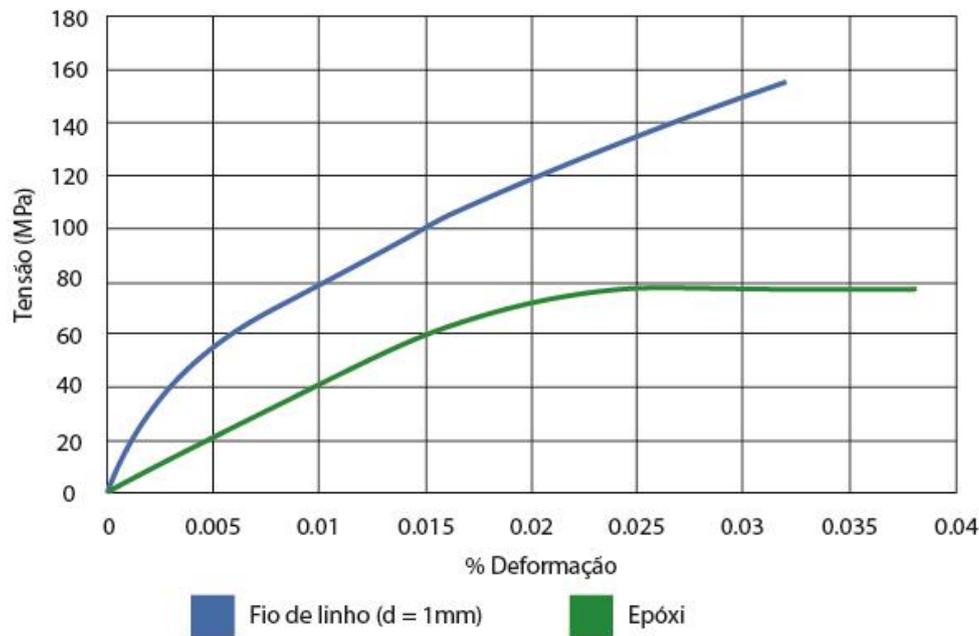
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos componentes do material compósito de epóxi e tecido de linho

Propriedades	Epóxi	Tecido de linho
Módulo de elasticidade (GPa)	3,89	16,25
Resistência à tração (MPa)	78	145,55
Tensão de ruptura (%)	3,5	3,15
Coeficiente de Poisson	0,35	0,2

Fonte: Adaptado de SLISERIS *et al.*, 2015

Os estudos apontam que as fibras de linho e matriz de PP ou epóxi apresentam um comportamento material altamente não linear. Mesmo para pequenas amostras, os resultados experimentais mostram uma curva tensão-deformação não-linear, como é possível observar na Figura 14.

Figura 14 - Gráfico de tensão/deformação



Fonte: Adaptado de SLISERIS *et al.*, 2015

Questão 3: Como funciona a simulação numérica computacional com materiais compósitos de matriz polimérica com fibras?

A simulação numérica computacional através da análise de elementos finitos provou ser uma técnica útil para caracterizar o comportamento mecânico de laminados compósitos em virtude de sua alta eficácia e baixo custo. Os estudos analisados apresentaram ótimos resultados de ensaios virtuais dos materiais compósitos utilizados.

Uma grande dificuldade para realizar uma boa simulação numérica é a representação deste material no espaço virtual. Segundo o artigo [A03] é possível levantar as dimensões exatas do material compósito em questão através de uma microtomografia e da utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Este melhor dimensionamento do material permite melhor precisão ao se criar a malha virtual para representar a matriz polimérica e as fibras/tecidos utilizados no compósito.

Outra metodologia interessante levantada pelo artigo [A03] é sobre a definição do RVE (*representative volume element*) para exprimir a célula unitária do material compósito. Os autores salientam que todo o compósito pode ser gerado traduzindo-se o RVE de qualquer vetor k ($2b_w, 2b_f, 0$) (sendo k um número inteiro). É importante mencionar que o RVE deve possuir a espessura do compósito para que a periodicidade do RVE não exista na direção 3. Esse método de homogeneização numérica funciona quando o comportamento do material

de cada fase é conhecido, sendo necessário saber as propriedades dos componentes que integram o material.

O método proposto pelo artigo [A03] é bastante geral e pode ser aplicado a outros laminados complexos e não se restringe à avaliação do comportamento termoelástico. O trabalho exposto neste artigo, esclarece como uma combinação de configurações experimentais e simulações numéricas pode fornecer previsões precisas do comportamento constitutivo do compósito de tecido liso, dedicado a aplicações estruturais não convencionais.

O trabalho realizado no artigo [A07] demonstra que é possível gerar, através de algoritmos, as estruturas incertas da fibra de linho, feixes de fibras e os defeitos de fibra, estes com distribuição aleatória. É gerado um defeito aleatório na fibra de linho, onde a distância média entre os defeitos é especificada. O algoritmo gera o número necessário de fibras e feixes de fibras, especificando a fração de volume sólido da fibra (SVF). O pacote de fibras sempre consiste em sete fibras com um diâmetro de fibra de 23% do diâmetro do pacote. Os autores destacam que essa geometria do feixe de fibras permite evitar problemas de malha ruins, se a distância entre as fibras adjacentes for muito pequena.

O estudo [A07] aponta que a geometria do material é discretizada por elementos finitos de tetraedro de 4 nós e que a qualidade da malha é controlada limitando a proporção máxima de aspecto do tetraedro a 5. A dimensão é proporcional à razão entre o comprimento máximo da borda e o raio do tetraedro.

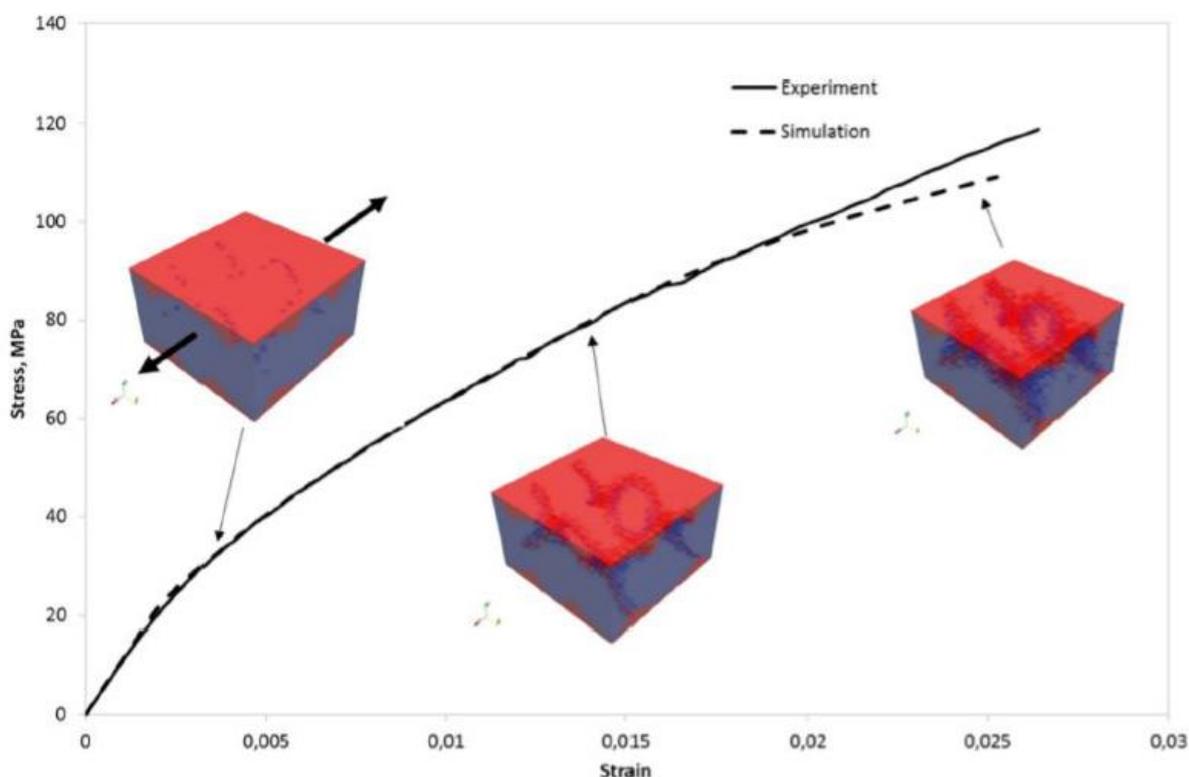
Para a simulação de tração, a carga é aplicada utilizando-se um deslocamento constante em um lado da amostra e o lado oposto é fixo. As condições de simetria são usadas para o RVE do compósito linho/epóxi e a geometria dos compósitos reforçados com fibra curta e compósitos reforçados com tecido de linho são geradas através da criação de um script python no software Salome-Meca 2015.

De acordo com estudo anterior referenciado pelos autores do artigo [A07], a resina epóxi pode ser modelada com uma plasticidade não linear. Neste estudo, as resinas foram modeladas de acordo com modelo de plasticidade de Von Mises, com endurecimento isotrópico dado pela curva de tensão.

As simulações numéricas de compósitos epóxi reforçados com tecido de linho são baseadas nas investigações experimentais realizadas por Sliseris *et al.* (2015), o que tem mais probabilidade de se aproximar ao compósito de epóxi e denim em desenvolvimento. O tecido de linho possui uma estrutura de trama simples, com uma densidade de 550 g/m² e um diâmetro de fio de 1 mm. Os fios de linho são virtualmente gerados e simulados. O estudo presume que a linha média do fio de linho seja uma função sinusoidal. Os fios de linho têm seção transversal circular e nas zonas de contato dos fios é permitida uma pequena sobreposição de fios.

Os resultados alcançados pelo estudo do artigo [A07] são ótimos e demonstram a possibilidade de aplicação deste processo para diversos materiais compósitos laminados, como é o caso do material de interesse. Na Figura 15 observa-se os resultados comparativos entre o ensaio mecânico de tensão e a simulação numérica para o mesmo material compósito de linho/epóxi.

Figura 15 - Ensaio X Simulação

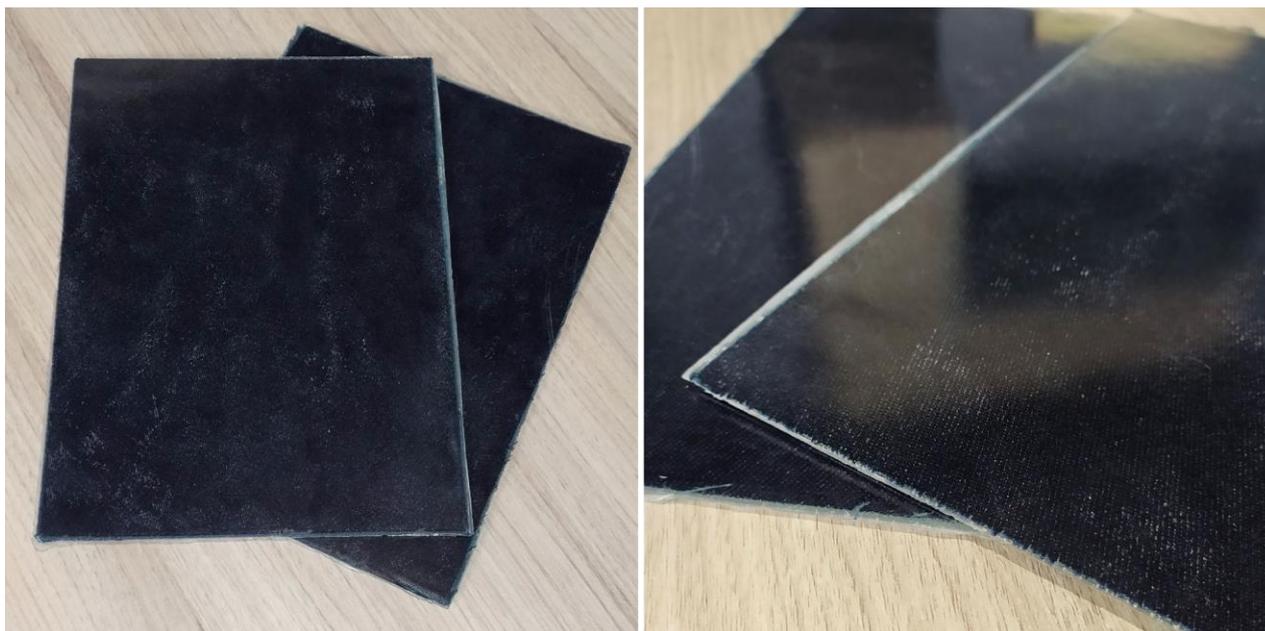


Fonte: SLISERIS *et al.*, 2015

4.2 Placas do material compósito laminado com resíduos têxteis

Do processamento do compósito laminado de resíduos têxteis e matriz polimérica termorrígida de epóxi (conforme processo detalhado na seção de metodologia), resultaram duas placas rígidas, leves e lisas, como é possível observar na Figura 16. As placas diferenciam-se apenas pelas orientações das fibras dos tecidos planos de denim, uma estando em 0° e 90° em relação às bordas e a outra em $+45^\circ$ e -45° em relação às bordas.

Figura 16 - Placas de compósitos laminados



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir destas placas, foram cortados em máquina de corte a laser os corpos de prova para a realização dos ensaios mecânicos destrutivos de caracterização, possibilitando posterior estudo para aplicação das simulações numéricas e emprego deste material no design de produto.

4.3 Caracterização do material compósito

Em seguida, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do material compósito laminado de resíduos têxteis e matriz polimérica termorrígida em epóxi. Como já mencionado, em razão da estipulação das delimitações da pesquisa, foram realizados os ensaios de tração e cisalhamento para o material compósito laminado, sendo estes ensaios suficientes para o levantamento de dados necessários para realizar as simulações numéricas computacionais.

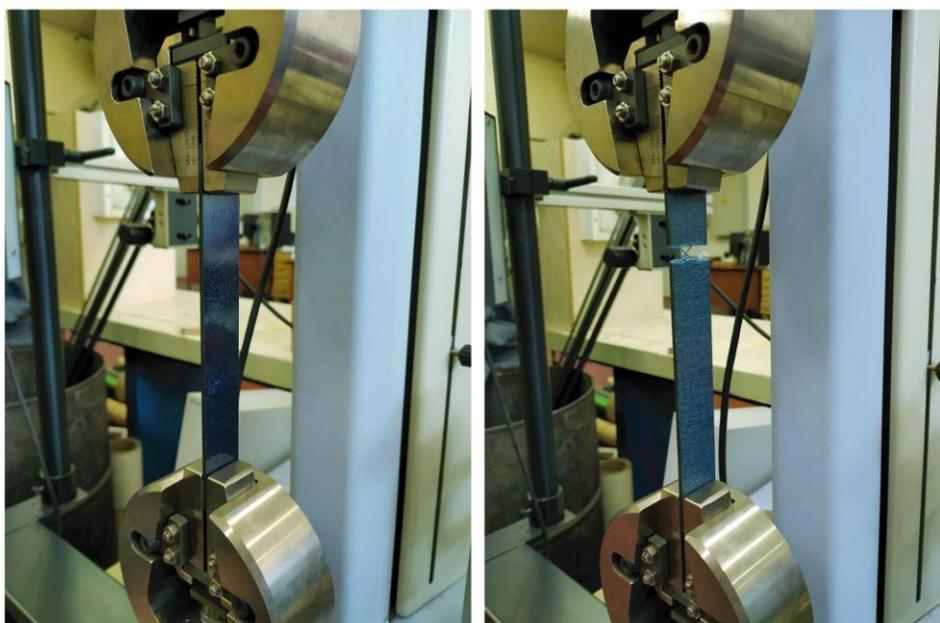
4.3.1 Ensaio Mecânico de Tração

O ensaio mecânico de tração foi realizado na maquetaria da Faculdade de Arquitetura da UFRGS em uma Máquina Universal de Ensaio Shimadzu com capacidade de até 5kN e velocidade de 2 mm/min, atendendo aos critérios especificados pela respectiva norma ASTM D3039. Foram realizados cinco testes para que o levantamento de dados para o material

compósito seja consistente e se possa fazer a média dos valores obtidos com maior assertividade nos resultados.

Houve uma boa proximidade geral nos resultados obtidos nos ensaios de cada corpo de prova, validando uma boa homogeneidade na produção do material, assim como, coerência nos dados levantados com este ensaio mecânico de caracterização de material. Na Figura 17 é possível observar dois momentos na realização do ensaio, posicionamento do corpo de prova nas garras e seu rompimento após a execução do ensaio.

Figura 17 - Execução do ensaio de tração e rompimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados do ensaio de tração são apresentados na Tabela 5 e Figura 18 e podem ser observados integralmente e com maiores detalhes no apêndice A.

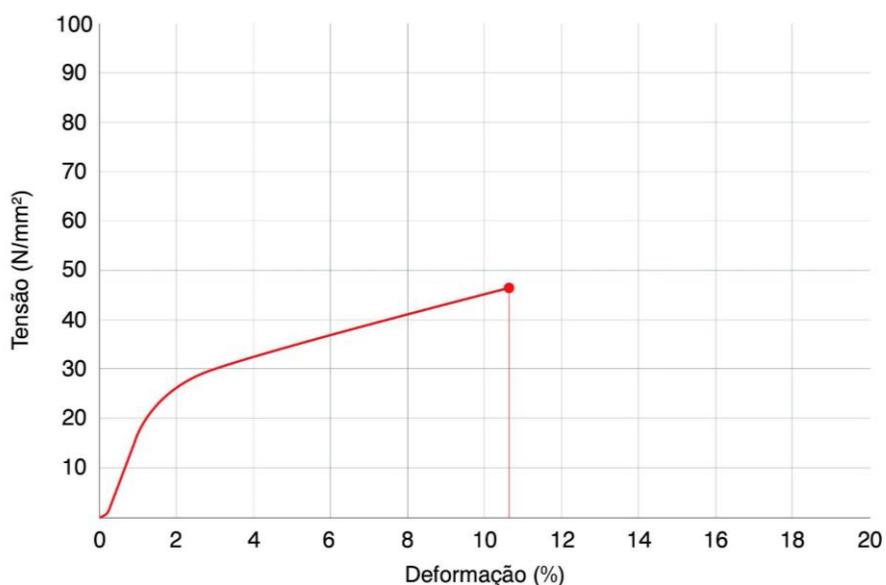
Tabela 3 - Resultados ensaio de tração

Medição	Média dos resultados
Força de ruptura (N)	2.427,17
Tensão de ruptura (N/mm ²)	46,32
Deslocamento de ruptura (mm)	14,44
Deformação de ruptura (%)	10,66
Módulo de elasticidade (N/mm ²)	2.114

Fonte: Elaborado pelo autor

Dentre os resultados do ensaio de tração apresentados, o resultado de maior relevância para esta pesquisa consiste no Módulo de Elasticidade (E), pois este dado é de fundamental importância para criação e definição das propriedades do material compósito no *software* Abaqus para realizar a simulação numérica proposta nesta pesquisa. É possível observar que a força necessária para o rompimento do corpo de prova foi de, em média, 2.427 N. O corpo de prova teve um alongamento de aproximadamente 10,66%, demonstrando uma boa capacidade de absorção de tensões com a participação das fibras do tecido. O Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young, ficou em média 2.114 N/mm², representando sua deformação sob carga no regime de elasticidade linear.

Figura 18 - Tensão X Deformação - Médias do ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.2 Ensaio Mecânico de Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento foram realizados no laboratório LAPOL da UFRGS em um equipamento Instron 3382 contando com vídeo extensômetro, os ensaios ocorreram com a velocidade constante de 2 mm/min e seguiram as demais especificações da norma ASTM D3518, seguindo a mesma lógica aplicada no ensaio de tração em relação a quantidade de testes e cálculo de médias dos resultados.

Assim como no ensaio de tração, houve uma boa proximidade nos resultados dos ensaios de cada corpo de prova, denotando coerência nos dados levantados na realização

deste ensaio. Na Figura 19 é possível observar dois momentos na realização do ensaio, posicionamento do corpo de prova nas garras e seu rompimento após a execução do ensaio.

Figura 19 - Execução do ensaio de cisalhamento e rompimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados do ensaio de cisalhamento são apresentados na Tabela 6 e Figura 20 e podem ser observados integralmente e com maiores detalhes no apêndice B.

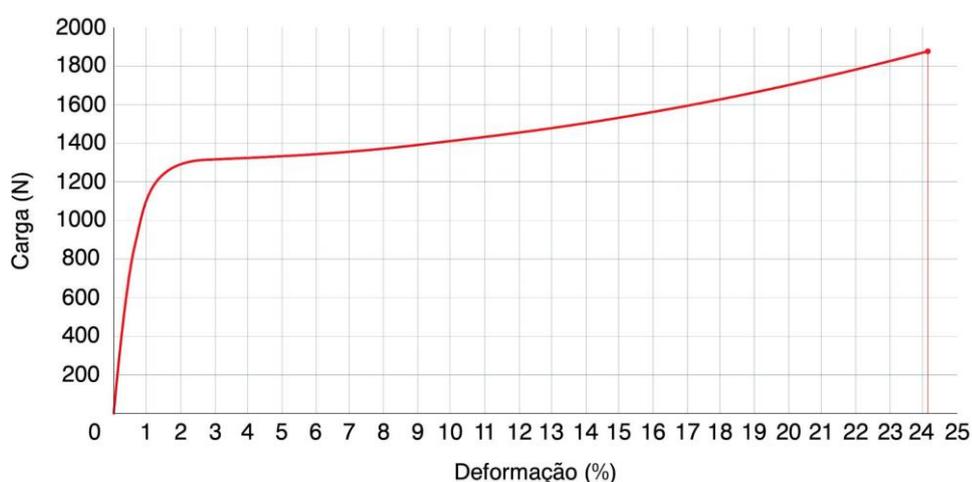
Tabela 4 - Resultados ensaio de cisalhamento

Medição	Média dos resultados
Força de ruptura (N)	1884,17
Tensão de ruptura (N/mm ²)	30,51
Deslocamento de ruptura (mm)	12,41
Deformação de ruptura (%)	24,13
Módulo de cisalhamento (N/mm ²)	2.752
Coefficiente de Poisson	0,41

Fonte: Elaborado pelo autor

Dentre os resultados do ensaio de cisalhamento apresentados, os resultados de maior relevância para esta pesquisa são representados pelo Coeficiente de Poisson (ν) e pelo Módulo de Cisalhamento (G), pois estes dados são primordiais para criação e definição das propriedades do material compósito no *software* Abaqus para a realização da simulação numérica. É possível observar que a força necessária para o rompimento do corpo de prova foi de 1.884,17 N. O corpo de prova teve um alongamento de aproximadamente 24,13%, maior em relação ao ensaio de tração. O Módulo de cisalhamento, ficou em média 2.752,00 N/mm², representando sua tensão de corte em relação a sua deformação. Por fim, o Coeficiente de Poisson ficou, em média, em 0,41, que representa a fração de expansão em seu comprimento pela fração de contração em sua largura quando submetido à uma deformação.

Figura 20 - Médias do ensaio de cisalhamento



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Seleção de materiais similares e possíveis aplicações

Partindo-se dos dados obtidos na fase de caracterização mecânica do material, esta seção da pesquisa tem o propósito de analisar possíveis áreas de aplicação para o compósito laminado de resíduos têxteis através de materiais similares levantados com a criação dos Mapas de Propriedades de Materiais (MPM) no *software* Granta Edupack 2021-R1.

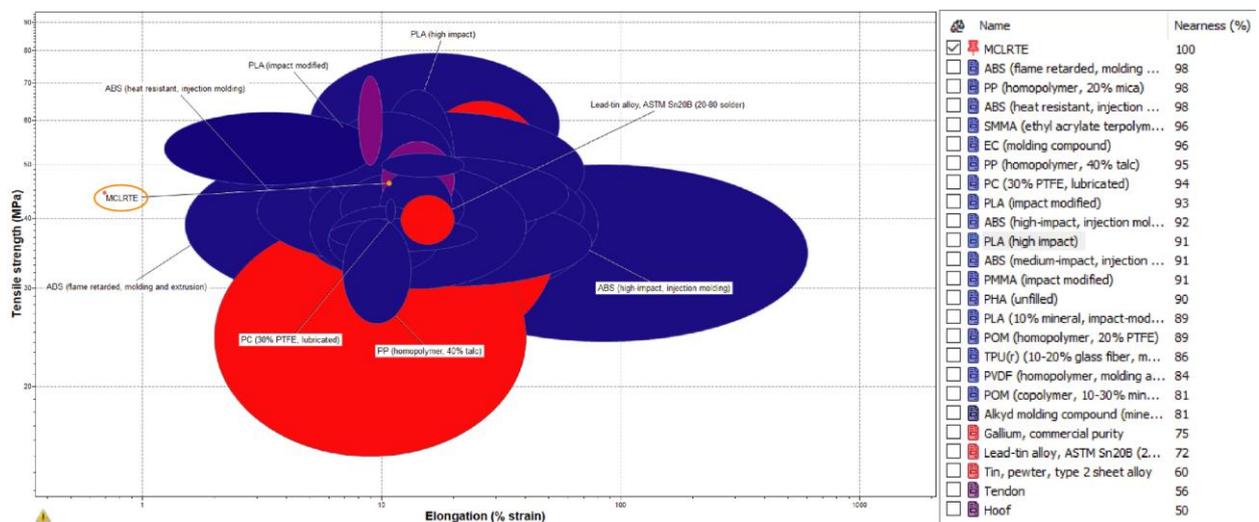
Os mapas de propriedades da amostra do material em estudo, nomeada por MCLRTE (Material Compósito Laminado de Resíduos Têxteis e Epóxi), gerados com os dados anteriormente citados, são apresentados nas Figuras 21 a 24.

O MPM1, de Resistência à Tração versus Alongamento (Tensão %), apresentado na Figura 21, retornou opções de materiais com valores próximos em relação a estas duas propriedades compostas por famílias de materiais poliméricos (representados pelos tons de azul), metais (representados pelos tons em vermelho) e compósitos (representados pelos tons em roxo).

Para selecionar somente os resultados próximos, os limites de valores para a Resistência à Tração foram estabelecidos entre 20 e 80 MPa e para o Alongamento, os valores ficaram entre 5 e 15%. Dentre os materiais selecionados através destas propriedades, os materiais de uso comercial comum que mais tiveram proximidade nos valores de propriedades em relação ao MCLRTE foram os seguintes:

- Variações de ABS e Polipropileno (PP) - ambos com correspondência de 98%;
- PLA, com similaridade em 93%.

Figura 21 - MPM1: Resistência à Tração vs. Alongamento



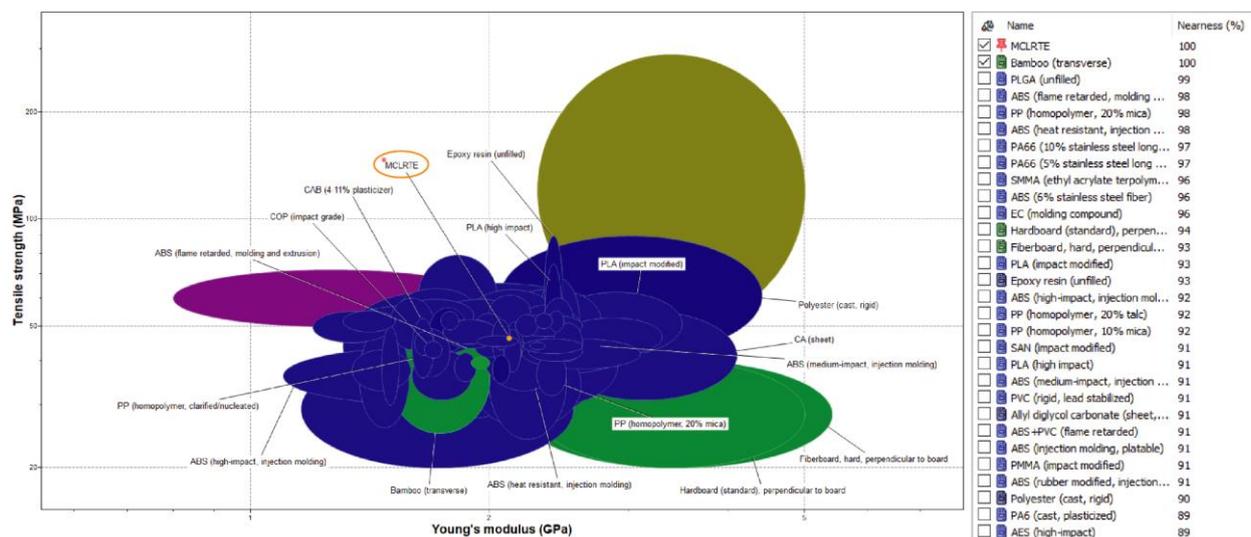
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do cruzamento das propriedades de Resistência à Tração versus Módulo de Young, o MPM2 criado (Figura 22) apresentou materiais das famílias de materiais naturais (representados pelos tons de verde), polímeros (representados pelos tons de azul) e compósitos (representados pelos tons de de roxo).

Os limites de valores nos eixos foram estabelecidos entre 20 e 80 MPa para a Resistência à Tração e entre 1 e 5 GPa para o Módulo de Young. Houve maior proximidade nos valores com os seguintes materiais:

- Bambu (no sentido transversal) com 100%;
- PLGA (Ácido-Láctico-Co-Glicólico) com 99% de correlação;
- Variações de ABS e Polipropileno (PP) com 98% cada;
- PLA com similaridade em 93%.

Figura 22 - MPM2: Resistência à Tração vs. Módulo de Young



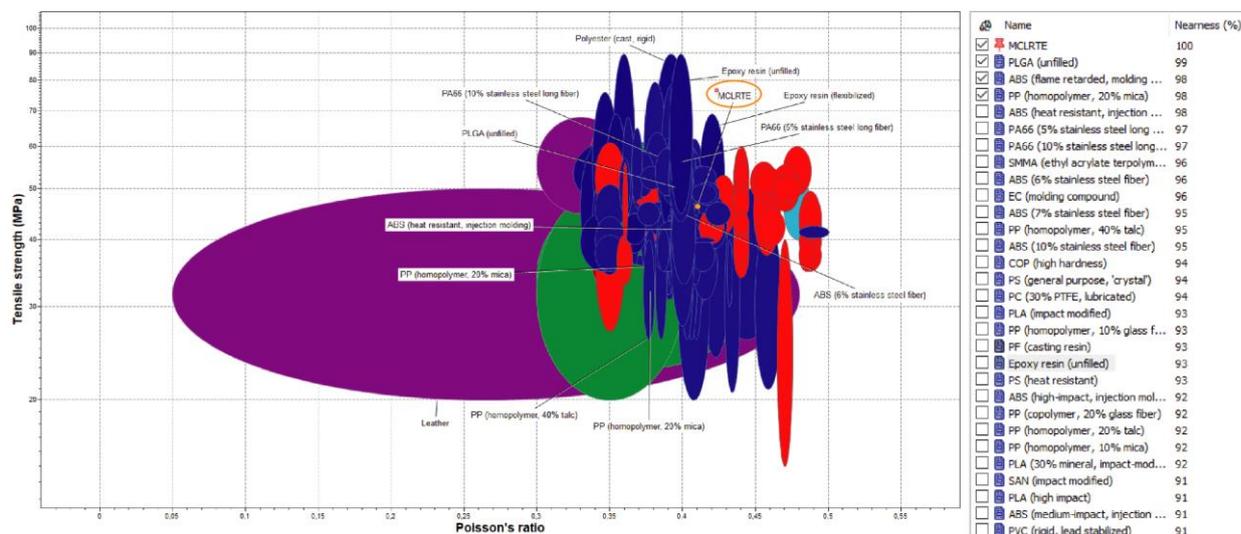
Fonte: Elaborado pelo autor

O MPM3, criado com o auxílio do *software* foi o de Resistência à Tração versus Coeficiente de Poisson (Figura 23), neste mapa podemos observar resultados compostos pelas famílias de materiais naturais (representados pelos tons de verde), materiais poliméricos (representados pelos tons de azul), compósitos (representados pelos tons em roxo) e materiais metálicos (representados pelos tons em vermelho).

Os resultados foram limitados entre 20 e 80 MPa para a Resistência à Tração e entre 0,3 e 0,5 para o Coeficiente de Poisson, de forma a selecionar apenas materiais com resultados próximos ao MCLRTE. Dentre os mais próximos nestas propriedades, estão:

- PLGA (Ácido-Láctico-Co-Glicólico) com 99% de correlação;
- Variações de ABS e PP com 98% de semelhança;
- PLA com 93%.

Figura 23 - MPM3: Resistência à Tração vs. Coeficiente de Poisson

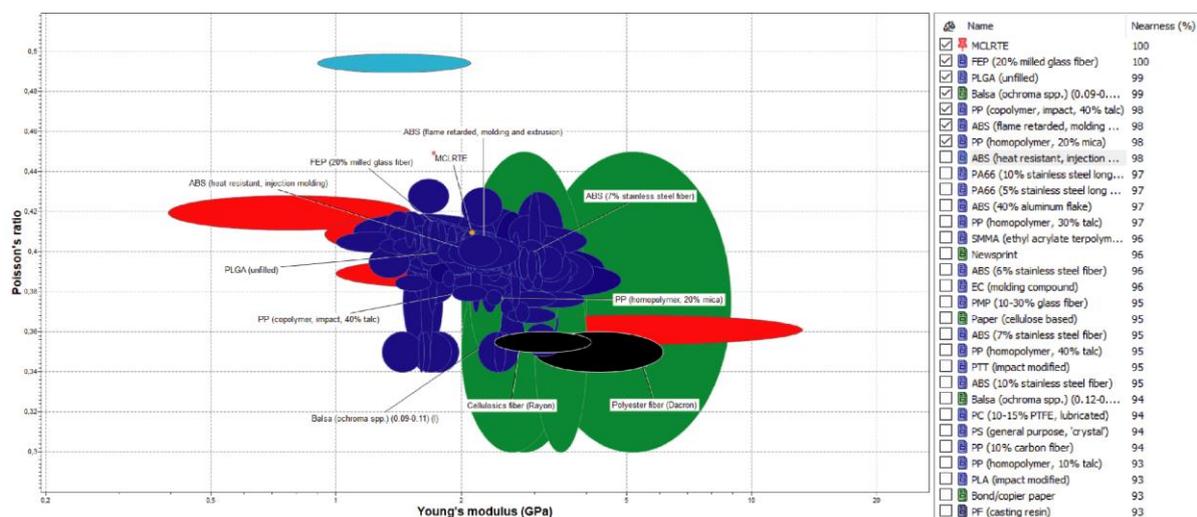


Fonte: Elaborado pelo autor

O último, MPM4, criado foi o de Coeficiente de Poisson versus o Módulo de Young (Figura 24), sendo os valores limitados entre 0,3 e 0,5 para o Coeficiente de Poisson e entre 1 e 5 GPa para o Módulo de Young. Os resultados apresentados pertencem a famílias de materiais naturais (verde), polímeros (tons de azul) e metais (vermelho).

Dentre os resultados, os que apresentaram maior correlação ao MCLRTE foram os seguintes: FEP (etileno propileno fluorado) com 20% de fibra de vidro moída apresentou 100% de similaridade; PLGA (Ácido-Láctico-Co-Glicólico) e Madeira Balsa com 99%; variações de PP e ABS com 98% de proximidade; etc.

Figura 24 - MPM4: Coeficiente de Poisson vs. Módulo de Young



Fonte: Elaborado pelo autor

Como foi possível verificar nos resultados dos Mapas de Propriedades de Materiais mostrados anteriormente, alguns resultados apresentaram valores muito próximos ao material compósito em estudo. A partir dos materiais comerciais com maior similaridade nas respectivas propriedades de cada MPM, apresentados no Quadro 5, fez-se um levantamento das principais aplicações dos mesmos para, assim, explorar possíveis áreas de aplicação para o compósito laminado de resíduos têxteis. Dentre os materiais selecionados, a maioria são materiais poliméricos e dois materiais de origem natural que são madeiras.

Quadro 4 - Materiais selecionados com maior similaridade

Materiais	Família	Similaridade (%)	MPM
Bambu	Naturais	100	MPM2
FEP	Polímeros	100	MPM3
PLGA	Polímeros	99	MPM2; MPM3; MPM4
Madeira Balsa	Naturais	99	MPM4
ABS	Polímeros	98	MPM1; MPM2; MPM3; MPM4
PP	Polímeros	98	MPM1; MPM2; MPM3; MPM4
PLA	Polímeros	93	MPM1; MPM2; MPM3; MPM4

Fonte: Elaborado pelo autor

O Bambu é um material de origem natural e, conforme apontado por Pereira (2012) em seu estudo, é uma planta que apresenta o crescimento mais rápido do que qualquer, levando cerca de 3 a 6 meses para um broto atingir sua altura máxima, que pode chegar a 40 m em espécies gigantes. O material resultante da planta é de grande versatilidade, resistência, leveza e facilidade em ser trabalhado com ferramentas simples são qualidades que tem proporcionado ao bambu o mais longo e variado papel na evolução da cultura humana do que qualquer outra planta.

É um material que possui inúmeras aplicações e vem sendo utilizado desde civilizações antigas, principalmente com viés estrutural e para utensílios. Segundo dados fornecidos pelo *software* Granta Edupack 2021, as principais aplicações de Bambu como material são as seguintes:

- Construção Civil;
- Andaimas;
- Utilidades domésticas;
- Artesanatos;
- Mobiliários;
- Fabricação de papel;
- Cordas.

O segundo material da tabela, que também apresentou 100% de similaridade no que diz respeito ao cruzamento das propriedades do MPM3, foi o Etileno Propileno Fluorado (FEP), um material polimérico antiaderente criado pela empresa DuPont e vendido sob a marca Teflon® FEP. Conforme apresentado pela DuPont em seu boletim de propriedades, o FEP é um filme termoplástico transparente que pode ser selado a quente, termoformado à vácuo, soldado e laminado em muitos outros materiais, bem como ser usado como um excelente adesivo. É utilizado principalmente para revestimento em fiações, pode ser utilizado como revestimento para proteger moldes metálicos no processo de cura de epóxi para evitar que o epóxi se ligue ao molde e, ainda, é amplamente utilizado pela indústria química por apresentar extrema resistência a ataques químicos.

Seguindo na ordem de correspondência, como terceiro material selecionado temos o PLGA, um biopolímero que apresenta propriedades bioreabsorvíveis, ou seja, são totalmente metabolizados no meio fisiológico. Como apresenta Silva *et al.* (2013) em artigo para o Congresso Brasileiro de Polímeros, é um material com aplicações na área médico-hospitalar em dispositivos cirurgicamente implantáveis com funções temporárias (recuperação de tecidos ou órgãos), suturas cirúrgicas e dispositivos de liberação de fármacos (cápsulas de medicamentos).

Apresentando 99% de similaridade no que diz respeito às propriedades cruzadas no MPM4, a Madeira Balsa é uma madeira com ocorrência natural no Brasil, sendo conhecida por sua característica de baixa densidade e grande leveza em relação a outras madeiras. De acordo com o estudo de Barbirato (2018), este é um material natural que por apresentar propriedades de maciez, homogeneidade e ser de boa trabalhabilidade, é comumente utilizada em:

- Aerodelismo;
- Artesanatos em geral;
- Brinquedos;
- Embalagens;
- Construção de barcos;

- Boias;
- Painéis OBS.

O ABS (acrilonitrila butadieno estireno) é um polímero termoplástico muito utilizado em impressões 3D, sua origem é na década de 1960 e possui boa resistência mecânica (principalmente ao impacto), resistência química e estabilidade dimensional. Segundo Vossen (2009), o estireno age promovendo rigidez, facilidade no processamento e brilho ao material. Já a acrilonitrila confere resistência química e à flexão, bem como estabilidade térmica e, por fim, o butadieno oferece resistência ao impacto e tenacidade para o ABS. Este é um material que possui aplicação em diversas áreas por ser muito versátil, apresentar baixo custo e fácil processamento, suas principais aplicações são:

- Utilidades domésticas;
- Brinquedos;
- Artigos descartáveis;
- Móveis para jardim;
- Grades e painéis interiores de carros;
- Carcaças de eletrodomésticos;
- Computadores e celulares.

Seguindo a tabela de resultados, o PP (Polipropileno) é um material polimérico termoplástico derivado do petróleo com alto peso molecular e inerte. Possui três configurações distintas que variam de acordo com a configuração de carbono que contém o grupo metila pendente, sendo elas: atático (aPP), sindiotático (sPP) e isotático (iPP). A variação iPP apresenta uma estrutura semicristalina com boas propriedades térmicas e mecânicas, sendo a mais utilizada comercialmente. A facilidade de processamento, o baixo custo e a fácil reciclagem tornam o PP um dos termoplásticos mais utilizados industrialmente (BISCHOFF, 2012). Por apresentar estas características, o PP é empregado em diversas áreas, sendo as principais:

- Utilidades domésticas;
- Mobiliários;
- Carcaças de eletrodomésticos;
- Embalagens e tampas de garrafas;
- Indústria automobilística (para-choques, lanternas, interior, etc.);
- Recipientes alimentícios;
- Brinquedos.

Como informa Santos (2016) em seu trabalho, o PLA (poli ácido láctico) é um material polimérico termoplástico biodegradável e compostável. Possui algumas classes e independentemente da classe, sendo de estruturas amorfas ou cristalinas e de baixa ou alta massa molecular, em geral apresentam um comportamento frágil e rígido à temperatura ambiente, boa processabilidade e fácil reciclagem. Suas principais aplicações são as seguintes:

- Embalagens alimentícias e gerais;
- Sacolas plásticas de mercado;
- Garrafas e tampas;
- Utilidades domésticas;
- Filamentos de impressão 3D;
- Tecidos não-trançados.

Conforme os resultados apresentados e suas respectivas aplicações, entende-se que, apesar do alto grau de similaridade, as aplicações dos materiais FEP e PLGA não se adequam ao material compósito laminado de resíduos têxteis. Por serem aplicações muito específicas no caso do FEP e, para o PLGA, aplicações na área médico-hospitalar que requerem contato com o meio fisiológico não condizem com o material em estudo.

Os demais materiais selecionados com o auxílio do *software* supracitado revelaram as possibilidades mais promissoras de áreas de aplicações em projetos futuros para o compósito e são apresentadas algumas das principais alternativas a seguir no Quadro 6.

Quadro 5 - Áreas mais promissoras para aplicação do compósito

Área de aplicação	Materiais similares utilizados
Utilidades domésticas	Bambu / ABS / PP / PLA
Artesanato em geral	Bambu / Madeira Balsa
Mobiliários	Bambu / PP
Interior de carros	ABS / PP
Carcaças de eletrodomésticos e eletrônicos	ABS / PP

Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 Exemplo de aplicação do material compósito laminado

Conforme citado anteriormente, este material já foi aplicado em armações de óculos de sol e nesta seção será apresentado o procedimento e os resultados desta aplicação.

Para a confecção do protótipo, os retalhos de denim foram misturados com a resina epóxi e prensados camada com camada em moldes com as curvaturas principais da frente e das hastes. Para a produção da frente dos óculos são utilizadas um total de seis camadas, as quais são separadas em peças de camadas duplas para formar a peça completa. Essa separação de duas em duas camadas deve-se ao fato de que no interior da camada dupla do meio deve haver uma sobra de espaço para a lente se encaixar aos óculos. Dessa maneira, é possível cortar o material separadamente, pensando em aproveitar este espaço para o encaixe da lente.

Para a geração das hastes, o material é preparado e prensado em molde com um total de seis camadas, não sendo necessária a separação de duas em duas camadas como ocorre para a frente dos óculos.

Após o material estar curado e em sua pré-forma, como podemos observar na Figura 25 A, é realizado o corte na máquina a laser para que o material fique aproximado de sua forma final. Conforme o plano de corte ilustrado na Figura 25 B, é possível perceber a diferença do espaço das lentes do corte no desenho inferior em relação aos demais. Neste plano de corte também são retiradas peças para reforçar a área de encaixe das hastes com a frente e, também, aumentar a área de apoio na região do nariz, garantindo, assim, um maior conforto ao usuário. A área das lentes dos dois desenhos da região superior pode ser aproveitada para compor um chaveiro de brinde, buscando-se um melhor aproveitamento do material. O processo de corte é o mesmo para as hastes.

Figura 25 - Produção do material compósito em pré-forma e plano de corte



Fonte: Elaborado pelo autor

Após o corte a laser, as peças que compõem a frente dos óculos foram montadas e coladas umas nas outras com a resina epóxi, para garantir a boa fixação a montagem foi colocada no molde de curvatura em compressão até a cura total da resina. Com as peças coladas, Figura 26, inicia-se o processo de acabamento, principalmente com a ferramenta de micro retífica para o desbaste e lixas finas para o acabamento superficial das peças. O processo de acabamento é o mesmo para as hastes.

Figura 26 - Montagem das peças antes do acabamento



Fonte: Elaborado pelo autor

As charneiras foram inseridas na frente dos óculos após a realização de furos com a dimensão correta para um encaixe suave. Para garantir a boa fixação das charneiras, a resina foi aplicada nos furos para soldar as peças das charneiras. As partes das charneiras das hastes foram fixadas com o uso de parafusos. Com as charneiras acopladas em seus respectivos lugares, é feita a junção das hastes com a frente com o uso de um parafuso

transversal que une as duas peças das charneiras para cada lado dos óculos. Este processo de montagem é ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Processo de montagem dos óculos após acabamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a montagem das lentes, os óculos foram enviados a um laboratório ótico onde ocorre o processo de escaneamento dos aros internos dos óculos, o corte das lentes em CNC

e, por fim, a montagem. As lentes utilizadas foram lentes polarizadas com 400 UVA/UVB de proteção, as lentes polarizadas oferecem uma vantagem em relação às lentes orgânicas por terem maior maleabilidade, facilitando, assim, a montagem nas armações. A seguir, na Figura 28, é possível verificar o resultado final dos protótipos montados.

Figura 28 – Protótipos finalizados



Fonte: Elaborado pelo autor

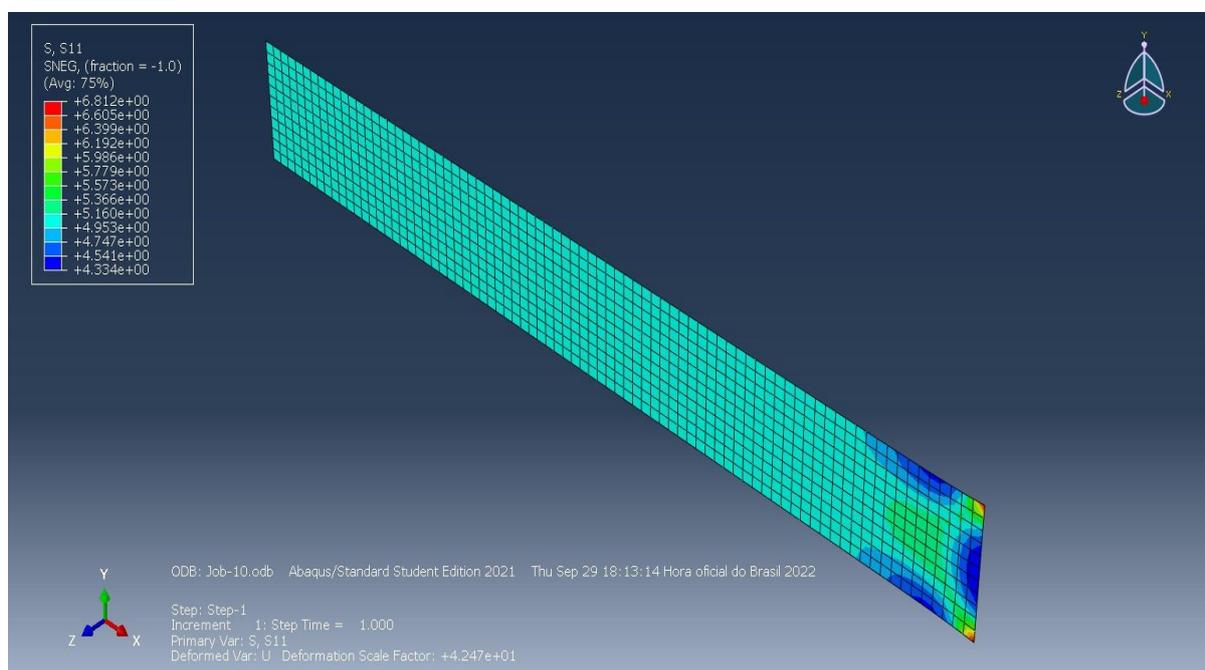
4.6 Simulações numéricas do material compósito laminado

Originando-se dos dados coletados com os ensaios mecânicos de caracterização do compósito, o presente estudo teve como objetivo realizar e validar simulações numéricas do material através do método de elementos finitos no *software* Abaqus CAE. Desta forma, tem-se em vista a possibilidade de futuros estudos virtuais para aplicação em projetos de produtos de acordo com as possibilidades de áreas de aplicação apresentadas na seção anterior. De

acordo com as delimitações de pesquisa apresentadas, as simulações numéricas foram experimentos para aplicar virtualmente o ensaio de tração em escala macroscópica e, assim, validar a hipótese de que as simulações numéricas podem ser um método efetivo de apoio ao projeto de produtos com este material.

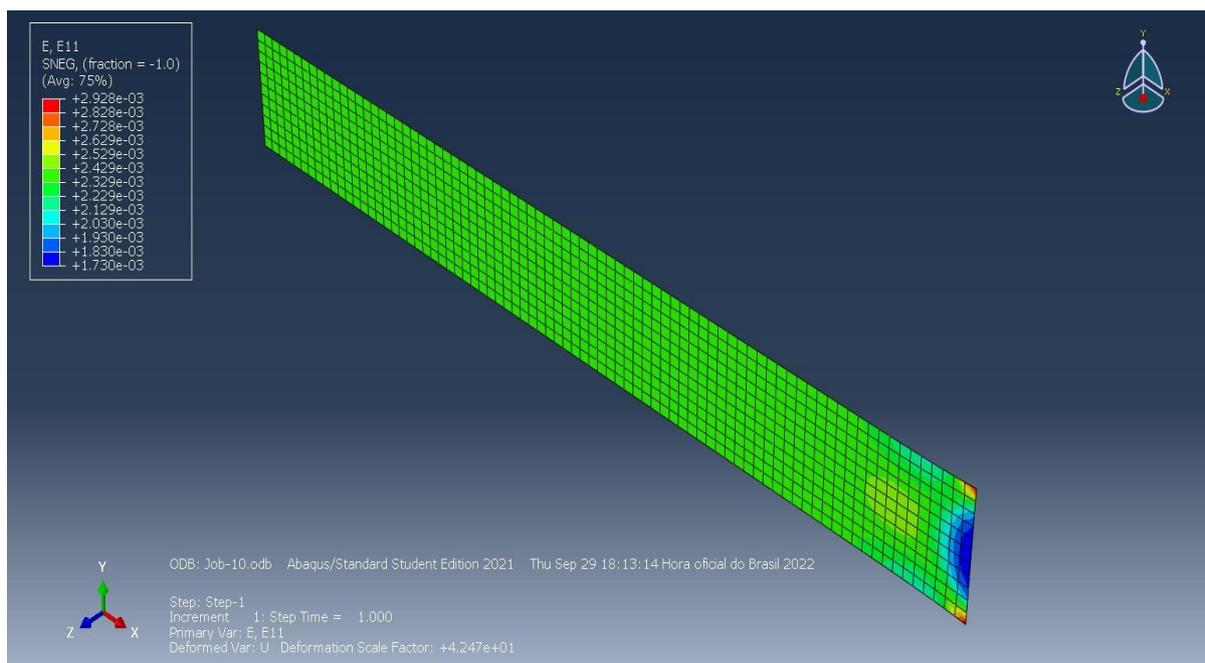
Inicialmente o *software* foi configurado com as definições gerais, de material, dimensões do corpo de prova, procedimento de análise, carregamento de forças, malha e elemento finito conforme apresentado na seção de metodologia. Após ajustes finos, foram rodadas três simulações com variação na força de carregamento, para posterior comparação entre os resultados virtuais e sequente conferência com a realidade. A seguir, nas Figuras 29 e 30, são apresentados os resultados do primeiro ensaio virtual (EV1), onde a força de tração (*Edge Load*) aplicada foi de 10 N/mm.

Figura 29 - Resultados EV1: Tensões (σ_{XX}) no eixo X



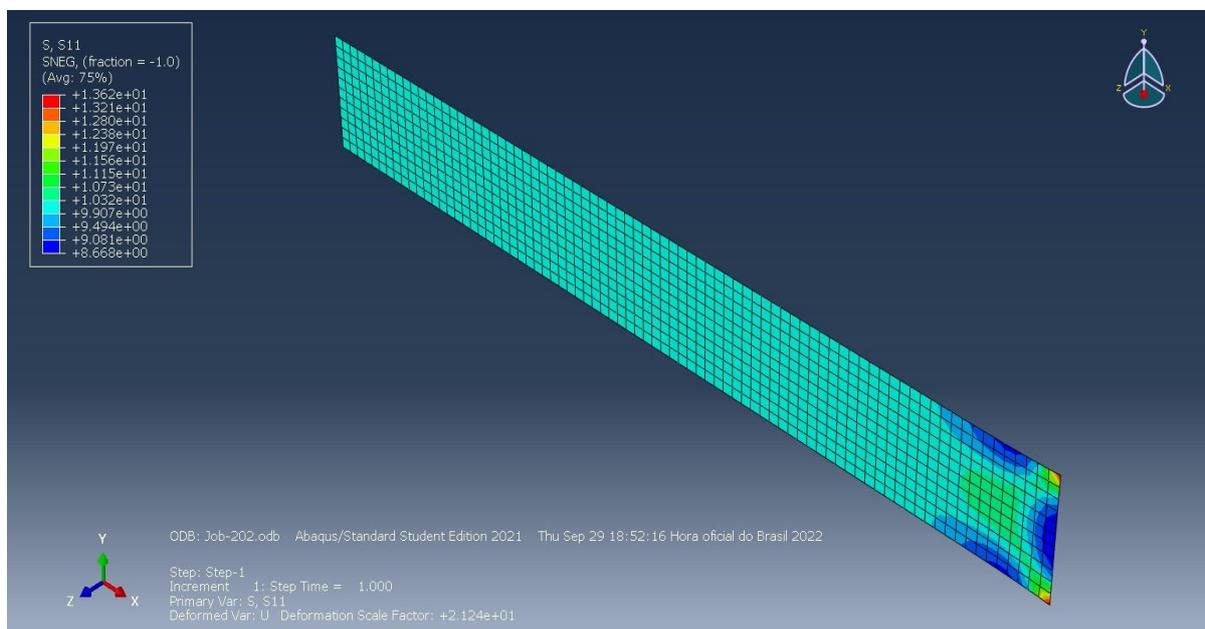
Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que as tensões apresentadas no corpo de prova ficaram, em média, em torno de 4,95 a 5,16 N/mm² em razão de o modelo apresentar 2mm de espessura, resultando como metade do valor da força aplicada como tração. Os resultados de deformações ficaram, em média, em 0,24% e são apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Resultados EV1: Deformações (ϵ_{xx}) no eixo X

Fonte: Elaborado pelo autor

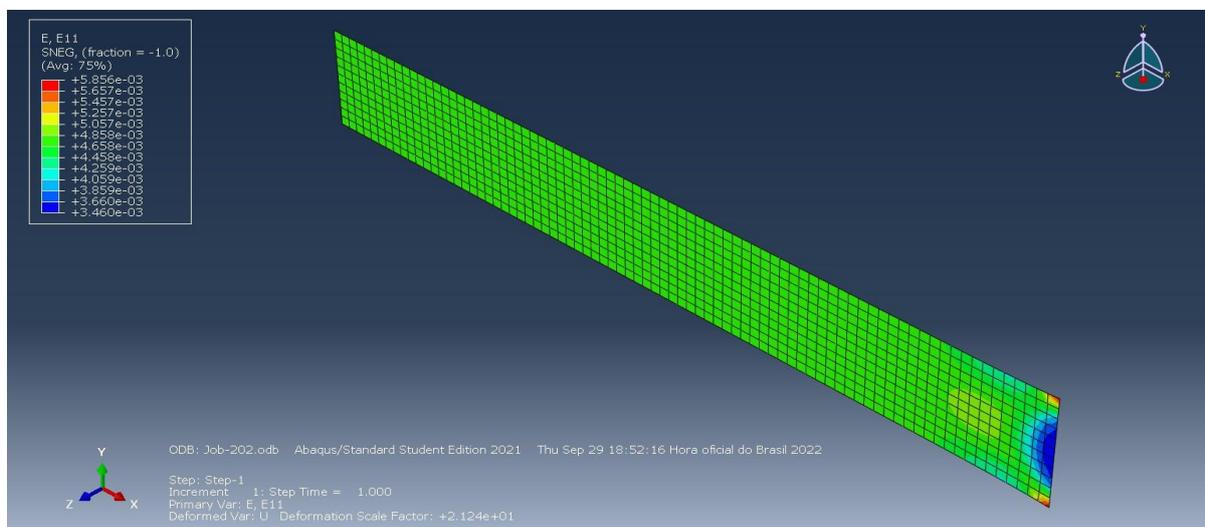
Para o segundo ensaio virtual (EV2), foi estabelecido o carregamento do tipo *Edge Load* como força de tração com o valor de 20 N/mm. Na Figura 31 podemos observar os resultados de tensões no eixo X, paralelo ao carregamento de forças.

Figura 31 - Resultados EV2: Tensões (σ_{XX}) no eixo X

Fonte: Elaborado pelo autor

Podemos constatar que as tensões apresentadas ficaram, em média, em torno de 9,90 a 10,32 N/mm². Já os resultados de deformações do EV2 ficaram, em média, em 0,48%, sendo apresentados na Figura 32.

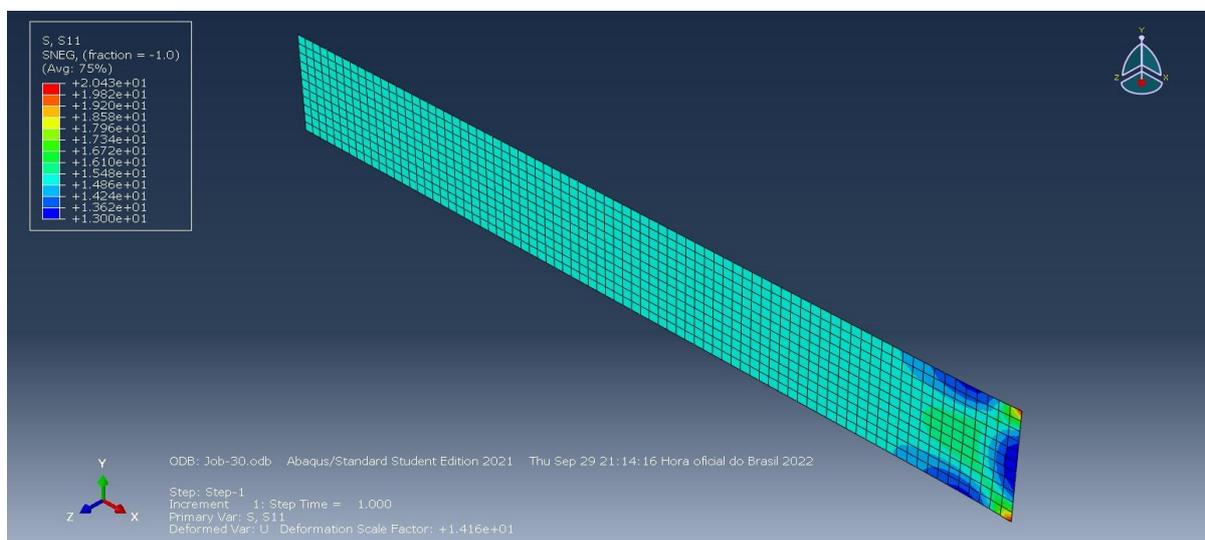
Figura 32 - Resultados EV2: Deformações (ϵ_{xx}) no eixo X



Fonte: Elaborado pelo autor

O terceiro ensaio virtual (EV3) foi configurado com o carregamento de tração (*Edge Load*) de 30 N/mm em paralelo ao eixo X. Na Figura 33 são explicitados os resultados de tensões a que o corpo de prova foi submetido.

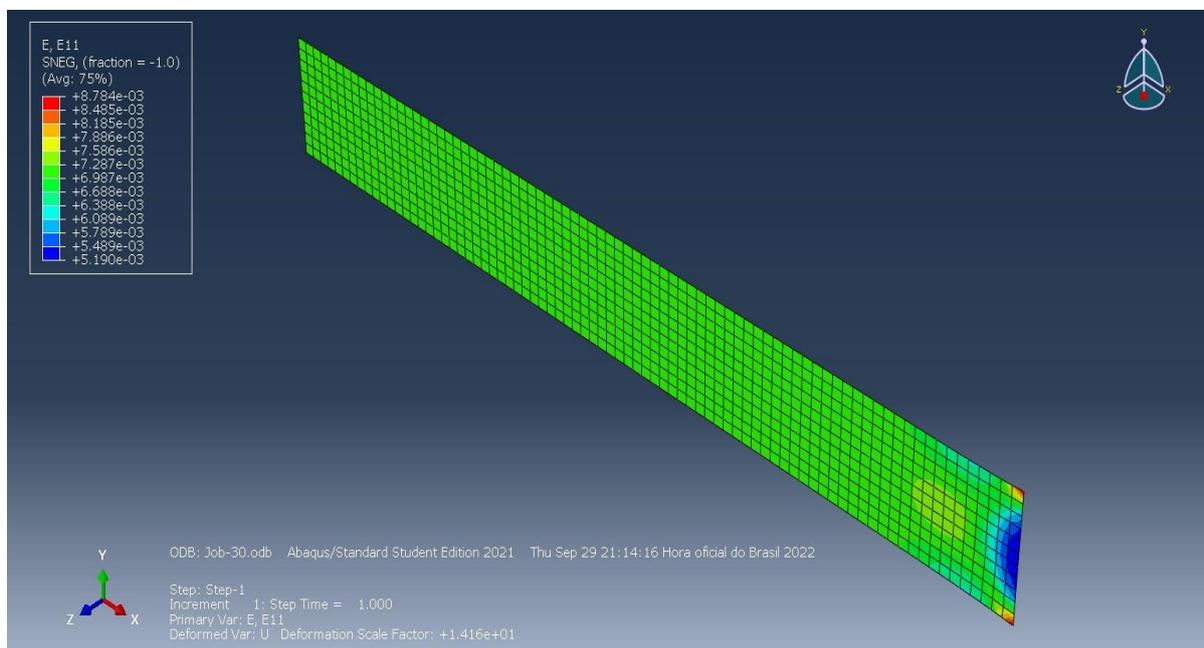
Figura 33 - Resultados EV3: Tensões (σ_{XX}) no eixo X



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que os resultados médios de tensões para o EV3 ficaram em torno de 14,86 e 15,48 N/mm². Os resultados referentes às deformações do corpo de prova ficaram, em média, em 0,72% como podemos inferir na Figura 34.

Figura 34 - Resultados EV3: Deformações (ϵ_{xx}) no eixo X

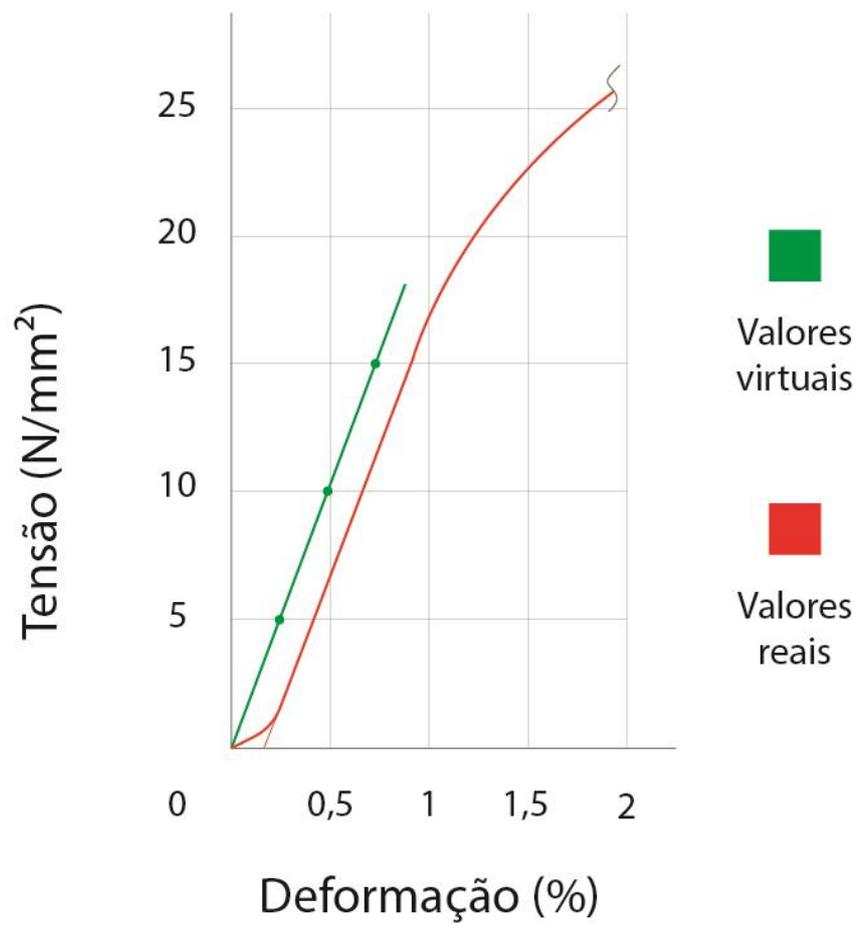


Fonte: Elaborado pelo autor

Após a execução dos três ensaios virtuais, com o objetivo de comparar os resultados virtuais com os resultados reais, elaborou-se um gráfico de tensão vs. deformação para confrontar a fase elástica do ensaio de tração com os valores obtidos nas simulações numéricas realizadas. Com os valores dos resultados virtuais lançados no gráfico, traçou-se a curva que representa os valores virtuais do módulo de elasticidade e em seguida foram lançados os dados referentes a fase elástica do ensaio de tração.

São apresentados os resultados comparativos na Figura 35, onde podemos observar que o módulo de elasticidade do ensaio virtual ficou paralelo ao módulo de elasticidade do ensaio de tração, apresentando um pequeno deslocamento em relação à curva do ensaio de tração em função do deslocamento presente no início da curva que não é linear, próximo à origem. Este deslocamento é muito comum e ocorre em razão de haver folgas na garra de fixação do corpo de prova no começo da aplicação da força de tração, após um pequeno avanço, o comportamento mantém-se linear.

Figura 35 - Comparativo entre valores reais e virtuais



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÃO

Sabe-se que os impactos ambientais gerados pelos setores industriais são um grande desafio para o desenvolvimento sustentável. Neste sentido, a presente pesquisa demonstrou a viabilidade técnica de promover a reutilização de resíduos têxteis, tanto os sólidos industriais quanto os de descarte pós-consumo, em um material compósito laminado com matriz polimérica em epóxi. Desta forma, aponta-se um caminho viável para a mitigação dos impactos ambientais negativos gerados pela indústria têxtil e confeccionista através de conceitos como a simbiose industrial, bem como seu efeito de gerar impactos positivos no âmbito econômico e social com a destinação destes resíduos como matéria-prima em novos processos. Além disso, esta solução pode ser considerada um estímulo ao desenvolvimento de novos projetos de produtos com a utilização deste material compósito.

A presente pesquisa abordou o potencial de aplicações com valor agregado para este novo material desenvolvido. O uso da metodologia de caracterização mecânica do material somado com os mapas de seleção de materiais mostrou-se pertinente para a análise proposta, possibilitando, assim, a visualização de algumas áreas possíveis para introduzir o material com maiores possibilidades de êxito. Dentre as possíveis áreas selecionadas e as características mecânicas do material compósito laminado de resíduos têxteis, o autor vislumbra maior assertividade de aplicação em novos projetos de produtos as áreas de utilidades domésticas, peças de artesanato e mobiliários.

O estudo propôs, também, como método de apoio ao projeto de produto, a utilização de simulações numéricas do material desenvolvido. As simulações numéricas de elementos finitos mostraram-se como um meio viável de validação de baixo custo para futuras aplicações do compósito estudado. Frente aos resultados das simulações realizadas, nota-se a possibilidade de se explorar esta ferramenta em futuros projetos de produtos como um grande apoio.

Diante da apresentação dos principais resultados e conclusões abordadas nesta dissertação, é oportuno salientar as contribuições científicas e inovações que a presente pesquisa gerou. O estudo apresentou conteúdo inovador, uma vez que propôs um processo de reutilização de resíduos têxteis como matéria-prima em materiais compostos, visto que não é uma prática usual no meio científico. A pesquisa inova ainda ao desenvolver como artefato o método geral para orientar a exploração de novas aplicações para materiais não convencionais através do processo de caracterização do material, seleção de materiais similares, análise de áreas de aplicações mediante os materiais similares e a validação de uso em novos produtos por meio das simulações numéricas computacionais. Destaca-se

ainda o caráter interdisciplinar do estudo, visto que se apropriou de conhecimentos das áreas de design, ciência de materiais, engenharias e qualidade ambiental.

Considera-se uma importante colaboração científica o fato de se propor uma via alternativa como solução de curto prazo para o problema de descarte de resíduos têxteis. É uma solução que reflete positivamente no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável e gera benefícios socioeconômicos com a utilização destes resíduos que, em sua grande maioria, seriam destinados a aterros sanitários.

Entende-se que a pesquisa alcançou os objetivos propostos e que, juntamente com a metodologia empregada, conduziram a pesquisa ao êxito almejado. O uso da Design Science Research como metodologia de pesquisa se mostrou adequado ao contexto que este trabalho esteve inserido, sendo de grande importância para manter o rigor necessário para uma dissertação. Finalmente, a hipótese levantada foi verificada e validada.

O presente estudo indica um caminho factível para a reutilização de resíduos têxteis como matéria-prima para novos materiais compósitos. Partindo-se dos resultados obtidos, considera-se a possibilidade de aprofundamento em mais ensaios de caracterização do material para obtenção de dados ainda não levantados sobre o respectivo material. Outro aspecto de grande relevância para futuros estudos com o material compósito laminado de resíduos têxteis é a possibilidade de utilização de resina epóxi com origem biológica, ampliando, assim, seu caráter sustentável.

Vislumbra-se também a oportunidade de se explorar novas simulações numéricas para este material, como por exemplo, realizar simulações contendo a fase elástica e plástica do material, bem como aplicar em projetos de produtos para total virtualização do projeto de design de novos produtos com este material compósito.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J; MONTEIRO, S. **Efeito da Variação da Razão Resina/Endurecedor sobre a Resistência ao Impacto de uma Resina Epóxi**. Polímeros: Ciência e Tecnologia. 2013.
- ANCELOTTI, A. C. J. **Efeitos da Porosidade na Resistência ao Cisalhamento e nas Propriedades Dinâmicas de Compósitos de Fibra de Carbono/Resina Epóxi**. 203 f. Dissertação de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2006.
- ANSYS, Inc. Granta Edupack: Software for materials education. 2022. Página inicial. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>> Acesso em: 19 de set. de 2022.
- ASHBY, M. F.; CEBON, D. **Materials selection in mechanical design**. Le Journal de Physique IV. 3(C7):C7-1-C7-9, 1993.
- ASHBY, M. F. **Multi-objective optimization in material design and selection**. Acta Materialia. 48:359-369, 2000.
- ASHBY, M. F.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials, engineering, Science, processing and design, third edition**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- ASTM D3039 / D3039M. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. EUA, 2002.
- ASTM D3518 / D3518M. **Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 645° Laminate**. EUA, 2001.
- ASTM D3878-04A. **Standard Terminology for Composite Materials**. EUA, 2017.
- BARBIRATO, G. H. A. **Forro OSB de Madeira Balsa residual aplicado em protótipo de avião**. Dissertação de mestrado - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga. 2018.
- BEYLERIAN, G. M.; DENT, A. **Ultra materials: how materials innovation is changing the world**. Kingdom: Thame & Hudson, 2007.
- BISCHOFF, E. **Morfologia de nanocompósitos de Polipropileno modificados com Resina Hidrocarbônica**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Química, Porto Alegre. 2012.
- BORGO, S.; VIEU, L. **Artifacts in formal ontology**. Philos. Technol. Eng. Sci., 2009.

BORSOI, C. *et al.* **Obtenção e Caracterização de Compósitos Utilizando Poliestireno como Matriz e Resíduos de Fibras de Algodão da Indústria Têxtil como Reforço.** *Polímeros*, vol. 21, nº 4, p. 271-279. 2011.

CABRAL, RF. *et al.* **Estudo da resistência mecânica e análise térmica da resina epóxi.** *Revista Teccen*. 2018.

CASTRO, A; FRANCISQUETTI, E; GASPARIN, A. **Influência da temperatura e tempo de cura na transição vítrea da resina epóxi.** *Scientia cum Industria*, V-7. 2019.

COHEN, M. **Materials and Man's Needs.** Summary Report of the Committee on the Survey of Materials Science and Engineering, Washington. 1974.

CONFORTO, E. C. *et al.* **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática:** aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. [s.l: s.n.].

ELLWANGER, C.; SILVA, R. P.; CAMPOS, M. DE B. **Modelagem e simulação em sistemas dinâmicos sob a ótica sistêmica:** uma revisão sistemática para sua condução e delineamento. p. 1–28, 2014.

FROSCH, R. A.; GALLOUPOLOUS, N. E. **Strategies for manufacturing.** *Sci Am*; 261(3):144–52, 1989.

FROSCH, R. A. **Industrial Ecology:** A Philosophical Introduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 89, 800-803, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.800>>

GALVÃO, L. F. B. **A influência do processo de cura nas propriedades do compósito estrutural carbono/epóxi fabricado via VARTM:** processamento e caracterização. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/94411>>.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GERLACH, R. *et al.* **In-plane and through-thickness properties, failure modes, damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading.** Elsevier, 2011.

GIRARD, G *et al.* **Experimental and numerical characterization of thin woven composites used in printed circuit boards for high frequency applications.** Elsevier, 2018.

GRANTA DESIGN. **How Tecumseh use systematic materials selection to reduce costs while enhancing quality and reliability.** 2016. Disponível em: <https://www.grantadesign.com/news/news/reports/tecumseh.shtml>

HENNING, F. *et al.* **Fast processing and continuous simulation of automotive structural composite components.** Elsevier, 2018.

HEVNER, A. R. **A Three Cycle View of Design Science Research.** Scandinavian Journal of Information Systems, [S. l.], v. 19, n. 2, 2007. Disponível em: <http://aisel.aisnet.org/sjis/vol19/iss2/4>

HOFER, U. *et al.* **Multiscale modeling of the viscoelastic response of braid-reinforced polymers: Model formulation and experimental assessment considering different rheological models.** Elsevier, 2019.

HOLMSTROM, J.; KETOKIVI, M.; HAMERI, A.-P. **Bridging Practice and Theory : A Design Science Approach.** Decision Science, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 65–87, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2008.00221.x>

JOHANNESSON, P.; PERJONS, E. **An Introduction to Design Science,** Springer, 2014.

KORICHO, E. G.; BELINGARDI, G. **An experimental and finite element study of the transverse bending behaviour of CFRP composite T-joints in vehicle structures.** Elsevier, 2015.

MA, S. *et al.* **Bio-based epoxy resin from itaconic acid and its thermosets cured with anhydride and comonomers.** Green Chemistry. 2013.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de Metodologia Científica .** São Paulo: Atlas, 2010.

NEJELISKI, D. M. *et al.* **Seleção de materiais invertida: da caracterização do material as possibilidades de aplicação no design de produto.** DAPesquisa, Florianópolis. 2021.

NIKAFSHAR, S. *et al.* **A renewable bio-based epoxy resin with improved mechanical performance that can compete with DGEBA.** The Royal Society of Chemistry. 2017.

NGUYEN, X. H. *et al.* **Module H: Eco-materials,** 2009.

OLIVEIRA, J. L. **Processamento e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras da palmeira real australiana**. Dissertação de mestrado. Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, Volta Redonda, 2015. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/45376727-Processamento-e-caracterizacao-de-compositos-de-polipropileno-reforcados-com-fibras-da-palmeira-real-australiana.html>>. Acesso em: 14 jul. 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/>>. Acesso em: 12 set. 2020.

PEREIRA, M. A. **Projeto Bambu: Introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações**. Tese de doutorado - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru. 2012.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. **Planos de gerenciamento de resíduos sólidos industriais**. 2018. Disponível em: <<https://portalresiduossolidos.com/planos-de-gerenciamento-de-residuos-solidos-industriais/>>. Acesso em: 23 out. 2021.

QATU M. S.; SULLIVAN, R. W.; WANG, W. **Recent research advances on the dynamic analysis of composite shells: 2000-2009**, *Composite Structures*, vol. 93, pp. 14-31, 2010.

RODRIGUES, J. SOUZA, J. FUJIYAMA, R. **Compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais da Amazônia fabricados por infusão**. Revista Matéria, V 20, n° 04, pp 946-960. 2015.

SALERNO, G. **Análise numérica de delaminação em materiais compósitos carbono-epóxi**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo. 2013.

SANTOS, E. F. **Síntese e aplicação de biooligoésteres como plastificantes ao Poli(Ácido Láctico): Estruturas e propriedades**. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Química, Porto Alegre. 2016.

SARTORATO, M. **Desenvolvimento de um Elemento Finito para Análise de Compósitos Inteligentes: Formulação, Implementação e Avaliação**. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo. 2013.

SILVA, A. T. C. R. *et al.* **Produção e caracterização de micropartículas do copolímero PLGA**. 12° Congresso Brasileiro de Polímeros (12°CBPol), 2013.

SLISERIS, J. *et al.* **Numerical modelling of flax short fibre reinforced and flax fibre fabric reinforced polymer composites**. Elsevier, 2015.

SUN, G. *et al.* **Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers.** Elsevier, 2018.

SUSTEXMODA. **Impactos da cadeia têxtil e indústria da moda.** 2021. Disponível em: <<https://www.sustexmoda.org/>>. Acesso em 09/01/2021.

TEFLON FEP: **Properties Bulletin.** 2022. Página inicial. Disponível em: <<https://www.teflon.com/ja/-/media/files/teflon/teflon-fep-film-properties-bulletin.pdf?rev=bdc9d9fadd754f8ebbd60d08d5afc8a9>> Acesso em: 29 de set. de 2022.

TOUMPANAKI, E. *et al.* **Effect of internal moisture content and dynamic mechanical analysis testing conditions on the Tg values of CFRP tendons.** Elsevier, 2019.

VAZ, L. E. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

VOSSSEN, C. A. **Nanocompósitos de ABS/PA e argilas organofílicas.** Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo. 2009.

WAGNER, T. *et al.* **Experimental and numerical assessment of aerospace grade composites based on high-velocity impact experiments.** Elsevier, 2018.

APÊNDICE A - RESULTADOS COMPLETOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Ensaio de tração compósito laminado

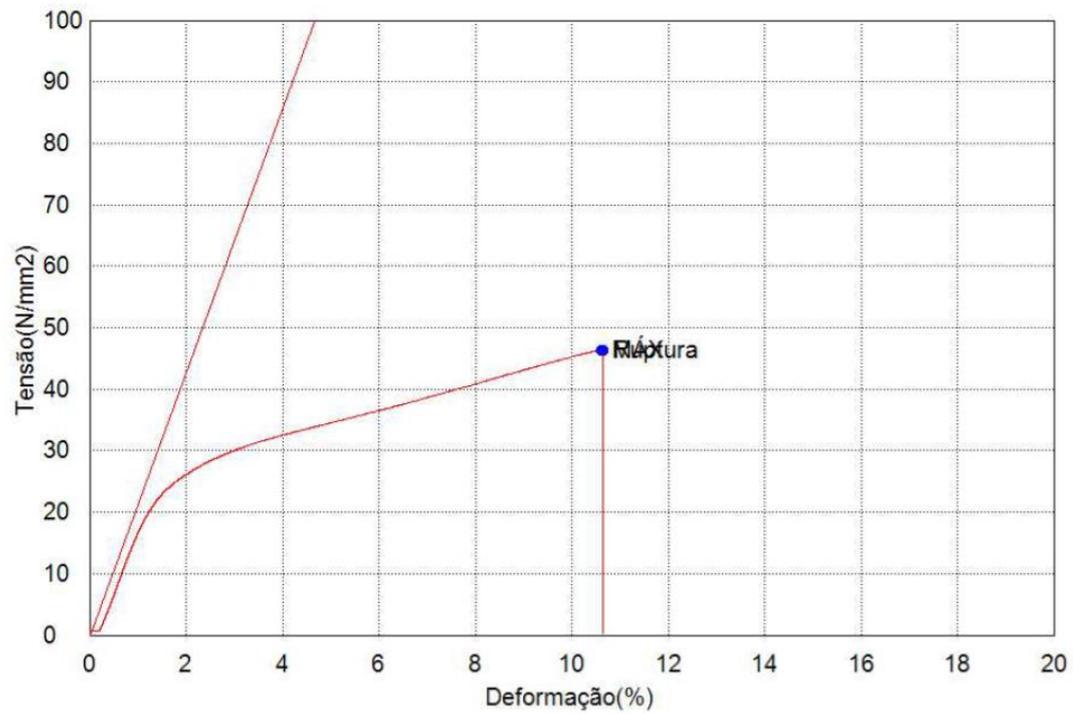
Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo do ensaio	tração laminado	Nome do arquivo do método	
Data do relatório	16/08/2021	Data do ensaio	16/08/2021
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	2mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	5

Nome	Ruptura_Força	Ruptura_Tensão	Ruptura_Deslocamento	Ruptura_Deformação
Parâmetros	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10
Unidade	N	N/mm2	mm	%
Amostra 01	2424.19	46.2676	14.4225	10.6439
Amostra 02	2451.78	46.7941	14.8236	10.9400
Amostra 03	2508.07	47.8685	15.0834	11.1316
Amostra 04	2337.57	44.6144	13.0968	9.66550
Amostra 05	2414.24	46.0776	14.8063	10.9271
Média	2427.17	46.3244	14.4465	10.6616
Desvio Padrão	61.9570	1.18249	0.79050	0.58340
Faixa	170.500	3.25410	1.98660	1.46610

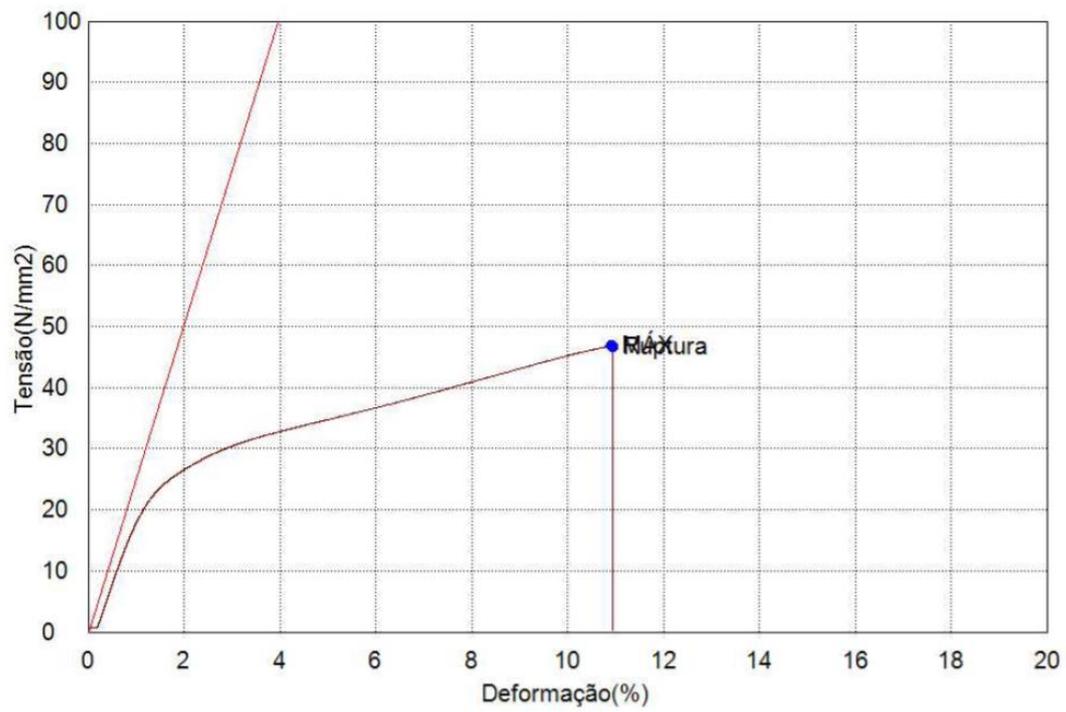
Nome	Max_Força	Max_Tensão	Max_Deslocamento	Max_Deformação
Parâmetros	Cálculo de áreas completas			
Unidade	N	N/mm2	mm	%
Amostra 01	2428.19	46.3439	14.3925	10.6218
Amostra 02	2452.72	46.8122	14.8123	10.9316
Amostra 03	2512.68	47.9565	15.0545	11.1103
Amostra 04	2338.18	44.6260	13.0911	9.66135
Amostra 05	2414.95	46.0911	14.8003	10.9227
Média	2429.34	46.3659	14.4301	10.6496
Desvio Padrão	63.2667	1.20752	0.78539	0.57960
Faixa	174.500	3.33050	1.96340	1.44895

Nome	Elástico	YP(%FS)_Força	YP(%FS)_Tensão	YP(%FS)_Deslocamento
Parâmetros	Força 10 - 20 N	0.1 %	0.1 %	0.1 %
Unidade	N/mm2	N	N/mm2	mm
Amostra 01	2146.68	--	--	--
Amostra 02	2530.19	--	--	--
Amostra 03	1856.61	--	--	--
Amostra 04	2110.99	--	--	--
Amostra 05	1925.28	--	--	--
Média	2113.95	--	--	--
Desvio Padrão	262.753	--	--	--
Faixa	673.580	--	--	--

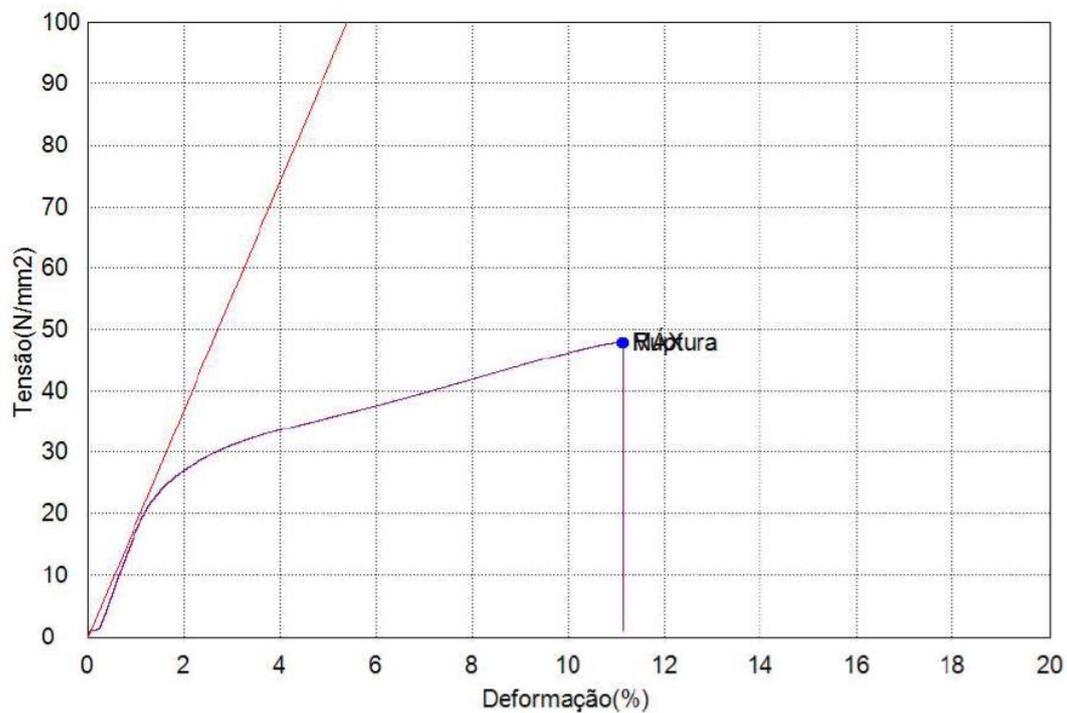
Amostra 1



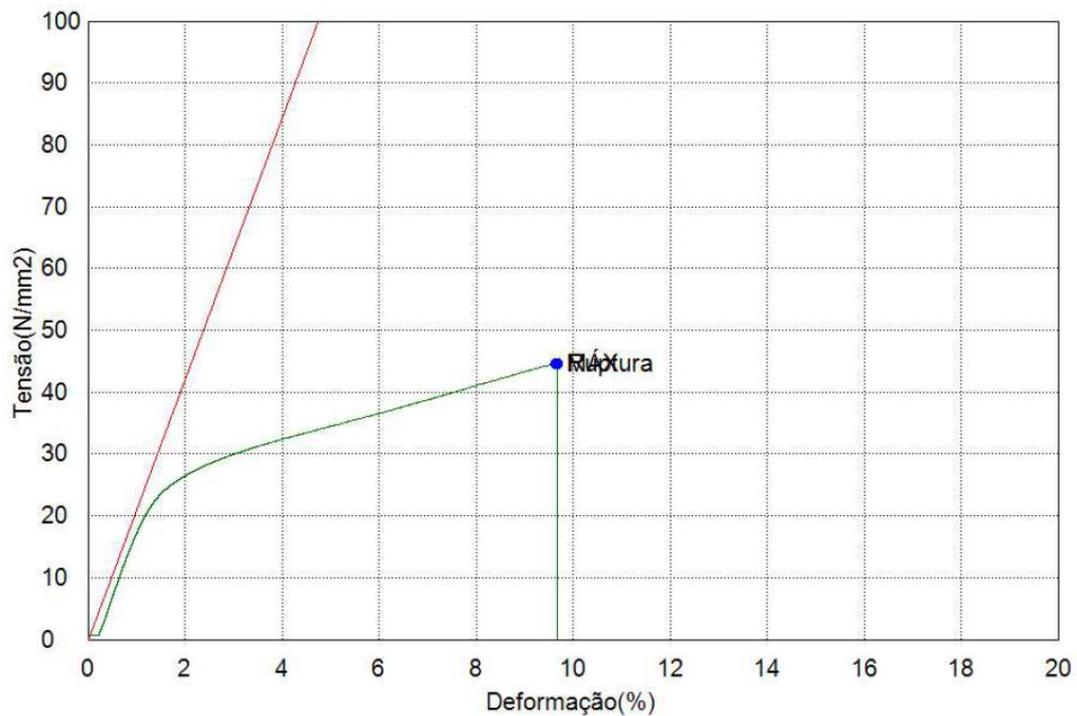
Amostra 2



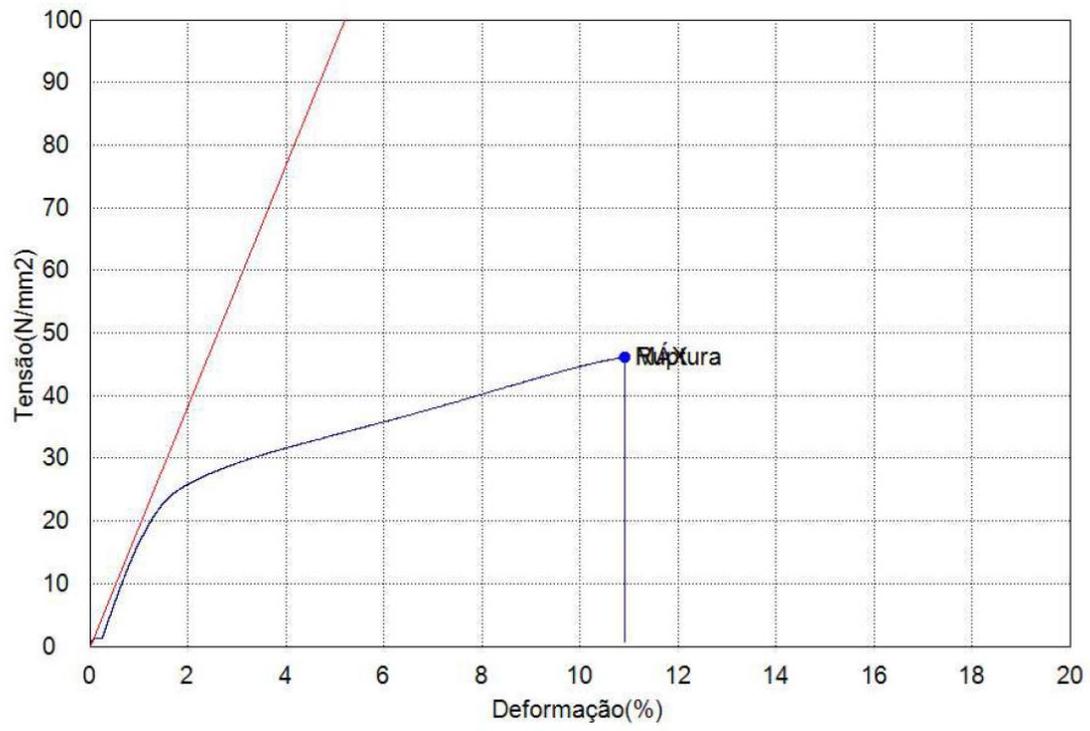
Amostra 3



Amostra 4



Amostra 5

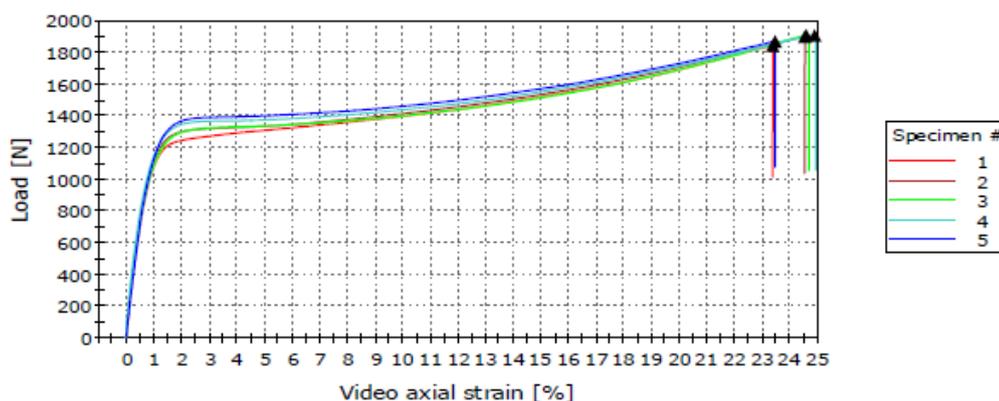


APÊNDICE B - RESULTADOS COMPLETOS DO ENSAIO DE CISALHAMENTO

Método de tração em termoplásticos até a ruptura, com o uso de AVE para a medida de módulo.

Laboratório	LAPOL
Operador	Icaro
Temperatura (C)	23
Umidade (%)	60
Rate 1	2.00000 mm/min

Specimen 1 to 5



	ID do CP	Width [mm]	Thickness [mm]	Tensile strain (Video axial strain) gauge length [mm]	Maximum Load [N]	Modulus (Chord - Cursor) [MPa]
	1	24.70	2.50	12.47	1841.48	2263
	2	24.70	2.50	12.35	1897.36	2130
	3	24.70	2.50	12.42	1907.09	2447
	4	24.70	2.50	12.47	1906.38	2493
	5	24.70	2.50	12.35	1868.55	2359
Mean		24.70	2.50	12.41	1884.17	2338
Standard deviation		0.000	0.000	0.060	28.545	146.008
Maximum		24.70	2.50	12.47	1907.09	2493
Minimum		24.70	2.50	12.35	1841.48	2130
Coefficient of variation		0.00000	0.00000	0.48254	1.51501	6.24390

	Modulus (Automatic Young's) [MPa]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Video axial strain at Maximum Load [%]	Poisson's ratio (Chord)
1	2565	29.82	23.340	-----
2	2788	30.73	24.502	-----
3	2785	30.88	24.547	-----
4	3169	30.87	24.856	-----
5	2451	30.26	23.427	-----
Mean	2752	30.51	24.134	-----
Standard deviation	274.642	0.462	0.699	-----
Maximum	3169	30.88	24.856	-----
Minimum	2451	29.82	23.340	-----

	Modulus (Automatic Young's) [MPa]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Video axial strain at Maximum Load [%]	Poisson's ratio (Chord)
Coefficient of variation	9.98134	1.51501	2.89732	-----

	Poisson's ratio (Least squares fit - Cursor)
1	0.40
2	0.42
3	0.41
4	0.49
5	0.34
Mean	0.41
Standard deviation	0.055
Maximum	0.49
Minimum	0.34
Coefficient of variation	13.23248