

FACULDADE VALE DO CRICARÉ
MESTRADO PROFISSIONAL EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E EDUCAÇÃO

VINICIUS SILVA DA CUNHA

**Desenvolvendo uma telha a partir do reaproveitamento
de resíduos sólidos provenientes de garrafas PET**

SÃO MATEUS
2019

VINICIUS SILVA DA CUNHA

**Desenvolvendo uma telha a partir do reaproveitamento de resíduos
sólidos provenientes de garrafas PET**

Versão Original

Dissertação apresentada à Faculdade Vale do
Cricaré para obtenção do título de Mestre em
Ciência, Tecnologia e Educação.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia
Orientador: Prof. Dr. Marcus Antonius da Costa
Nunes
Coorientador: Prof. Me. Antônio Carlos Barbosa
Zancanella

SÃO MATEUS
2019

Autorizada a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação

Mestrado Profissional em Ciência, Tecnologia e Educação

Faculdade Vale do Cricaré – São Mateus – ES

C972d

Cunha, Vinicius Silva da.

Desenvolvendo uma telha a partir do reaproveitamento de resíduos sólidos provenientes de garrafas PET / Vinicius Silva da Cunha – São Mateus - ES, 2019.

166 f.: il.

Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência, Tecnologia e Educação) – Faculdade Vale do Cricaré, São Mateus - ES, 2019.

Orientação: prof. Dr. Marcus Antonius da Costa Nunes.

Coorientação: Prof. Me. Antônio Carlos Barbosa Zancanella.

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Desenvolvimento integrado de produtos. 3. Compósito laminado. 4. Telha. 5. Viabilidade técnica. I. Nunes, Marcus Antonius da Costa. II. Zancanella, Antônio Carlos Barbosa. III. Título.

CDD: 333.7

Sidnei Fabio da Glória Lopes, bibliotecário ES-000641/O, CRB 6ª Região – MG e ES

VINICIUS SILVA DA CUNHA

**DESENVOLVENDO UMA TELHA A PARTIR DO
REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
PROVENIENTES DE GARRAFAS PET**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Educação da Faculdade Vale do Cricaré (FVC), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência, Tecnologia e Educação, na área de concentração Ciência, Tecnologia e Educação.

Aprovado em 08 de novembro de 2019.

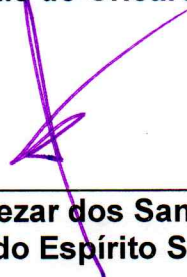
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcus Antonius da Costa Nunes
Faculdade Vale do Cricaré (FVC)
Orientador



Prof. Dr. José Geraldo Ferreira da Silva
Faculdade Vale do Cricaré (FVC)



Prof. Dr. Mario Cezar dos Santos Junior
Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)

À minha amada esposa, com carinho, amor, entusiasmo e gratidão por toda compreensão, afeto, incentivo, otimismo e infatigável apoio durante todo processo de desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe, por sua incansável dedicação, persistência e cuidados ao longo de toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o autor da vida.

Aos amigos e familiares que me apoiaram e incentivaram.

Ao professor Marcus Antonius da Costa Nunes, por me orientar.

Ao professor Antônio Carlos Barbosa Zancanella, por toda ajuda e orientação prestada.

Ao professor Mário Cesar dos Santos Junior, por ter ajudado com os testes finais do produto e com a manipulação e elaboração dos gráficos de tração e TGA.

Ao professor Kinglston Soares, pela contribuição dada ao realizar o ensaio TGA.

À professora Jeangela dos Santos Nascimento, por ter contribuído na realização dos ensaios de impacto Izod.

Ao professor Ney Francisco de Freitas Camelo, pela ajuda com a manipulação do software Autodesk Inventor.

Ao professor Jean Rubyo de Oliveira Lopes, por contribuir com o teste de carga estática na telha.

Ao servidor Madson Augusto Peixoto de Pinho, por ajudar na fabricação dos moldes.

À monitora do laboratório de ensaios do Ifes – *campus* São Mateus, Ana Laura Zucoloto, por contribuir na execução dos corpos de prova e fabricação da telha.

Ao estudante do curso de engenharia mecânica do Ifes – *campus* São Mateus, Vinicius Nascimento, por contribuir com a execução da matriz tramada de PET.

A todos os professores e membros das Coordenadorias dos Cursos Técnicos em Mecânica e da Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Ifes – *campus* São Mateus.

Aos Ifes – *campus* Vitória e São Mateus, por todo apoio e atenção prestada.

Ao SENAI – Civit, por permitir a utilização do equipamento para os ensaios de impacto Izod.

“Porque Deus amou o mundo de tal maneira que deu o seu Filho unigênito, para que todo aquele que nele crê não pereça, mas tenha a vida eterna.”

João 3:16

RESUMO

DA CUNHA, Vinicius Silva. **Desenvolvendo uma telha a partir do reaproveitamento de resíduos sólidos provenientes de garrafas PET**. 2019. 166f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Educação) - Faculdade Vale do Cricaré, São Mateus, 2019.

Desde a segunda conferência mundial da ONU, em 1984, as questões em torno do desenvolvimento sustentável foram discutidas com maior ênfase. A busca por soluções e a elaboração de planos de ação para o controle dos recursos naturais não são apenas para a preservação do meio ambiente, mas também para garantir as necessidades das futuras gerações. Diante disto, o número de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de produtos com menor impacto ambiental tem aumentado, tendo como exemplo o desenvolvimento de produtos gerados a partir de materiais reciclados, como garrafas PET e outros materiais. Um compósito laminado composto por uma matriz polimérica de PET reforçada com fibra de vidro agregada com resina epóxi foi desenvolvido e testado para ser utilizado na fabricação de uma telha. O desenvolvimento deste produto seguiu a metodologia de desenvolvimento integrado de produtos desenvolvida pelo NeDIP - Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos da Universidade Federal de Santa Catarina. O compósito desenvolvido obteve boas propriedades mecânicas: em média, sua resistência à tração foi de 75,04MPa com módulo de elasticidade de 6,41GPa, enquanto para flexão apresentou uma tensão axial de 91,28MPa e tensão de cisalhamento de 0,58Mpa; já a resistência ao impacto foi de 67,70KJ/m². De acordo com curva TGA, o material apresentou estabilidade térmica até 105°C e sofreu maiores perdas de massa a partir de 310°C. O protótipo da telha apresentou boa estabilidade térmica quando submetido a variações de temperatura ambiente; boas propriedades de resistência mecânica, suportando carga de 1,13KN no teste estático e 0,76KN no teste dinâmico; boa aparência; leveza e translucidez. Sua geometria simples, na forma ondulada, pesando aproximadamente 2Kg, com dimensões de 1100mm de largura por 500mm de comprimento e 2,5mm de espessura, permite fácil manuseio, transporte e instalação. Diante destas características, conclui-se que o produto desenvolvido é tecnicamente viável e altamente sustentável.

Palavras-chave: Desenvolvimento sustentável. Desenvolvimento integrado de produtos. Compósito laminado. Telha. Tecnicamente viável.

ABSTRACT

DA CUNHA, Vinicius Silva. **Developing a tile from reuse of solid waste from PET bottles**. 2019. 166p. Dissertation (Programa de Pós Graduação em Ciência Tecnologia e Educação) - Faculdade Vale do Cricaré, São Mateus, 2019.

Since the second ONU World Conference in 1984, issues around sustainable development have been discussed with greater emphasis. The search for solutions and the elaboration of action plans for the control of natural resources are not only for the preservation of the environment, but also to guarantee the needs of future generations. In view of this, the number of research focused on the development of products with lower environmental impact has increased, for example, the development of products generated from recycled materials, such as PET bottles and other materials. A laminated composite composed of an epoxy resin-bonded glass-reinforced PET polymeric matrix has been developed and tested for use in the manufacture of a tile. The development of this product followed the methodology of integrated product development developed by NeDIP - Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos of Santa Catarina. The composite developed good mechanical properties, on average its tensile strength was 75.04MPa with modulus of elasticity of 6.41GPa, while for flexion presented an axial stress of 91.28MPa and shear stress of 0.58Mpa, while Impact strength was 67.7KJ / m². According to TGA curve the material presented thermal stability up to 105°C and suffered greater mass losses from 310°C. The tile prototype showed good thermal stability when subjected to ambient temperature variations, good mechanical strength properties withstanding load of 1.15KN in static test and 0.78KN in dynamic test, good appearance, lightness and translucency. Due to its simple, wavy geometry, weighing approximately 2kg, with dimensions of 1100mm wide by 500mm long and 2.5mm thick, it allows for easy handling, transportation and installation. Given these characteristics, it is concluded that the product developed is technically viable and highly sustainable.

Keywords: Sustainable development. Integrated product development. Laminated composite. Tile. Technically viable

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Usos finais para o PET reciclado no Brasil	22
Figura 2 - Efeito da escala de custos de mudanças do produto nas diversas fases de desenvolvimento.	29
Figura 3 - Fases do desenvolvimento de produtos.....	30
Figura 4 - Representação genérica do modelo de referência	31
Figura 5 - Representação gráfica do modelo do processo de desenvolvimento integrado de produtos	32
Figura 6 - Seção transversal de um esqui de alto desempenho.....	36
Figura 7 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos	37
Figura 8 - Representações esquemáticas de compósitos com fibras	39
Figura 9 - Empilhamento de camadas sucessivas reforçadas com fibras orientadas para formar um compósito laminado	42
Figura 10 - Diagrama esquemático mostrando a construção de um painel-sanduíche com núcleo de colmeia	43
Figura 11 - Comportamento típico da curva tensão-deformação até a fratura .	46
Figura 12 - Representação esquemática de um dispositivo usado para ensaio de Tração	47
Figura 13 - Comportamento Tensão-Deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e altamente elásticos (elastoméricos) (curva C).....	48
Figura 14 - Curva tensão-deformação esquemática para um polímero plástico.	49
Figura 15 - Desenhos esquemáticos de (a) uma fibrilação em que são mostrados os micro vazios e (b) uma fibrilação seguida pela formação de uma trinca	50
Figura 16 - Curva tensão-deformação esquemática de compósito	51
Figura 17 - Ensaio de dobramento estendido para ensaio de flexão	53
Figura 18 - Comportamento tensão-deformação para polímeros frágeis (curva a), plásticos (curva b) e altamente elásticos (curva c).....	55
Figura 19 - Esquema do ensaio de impacto.....	57
Figura 20 - Curvas TGA das amostras de PET reciclado exposto aos diferentes ambientes.....	60
Figura 21 - Curvas DTG das amostras de PET reciclado exposto aos diferentes ambientes.....	60

Figura 22 - Representação do modelo de processo de desenvolvimento de produtos	72
Figura 23 - Fluxograma de gerenciamento de projetos.....	74
Figura 24 - Fluxograma da fase de projeto informacional	76
Figura 25 - Fluxograma da fase de projeto conceitual	77
Figura 26 - Corte longitudinal da garrafa PET	79
Figura 27 – Corte longitudinal das tiras de PET	79
Figura 28 - Matriz de PET tramada 5x5mm.....	80
Figura 29 - Processo de fabricação da matriz de PET	80
Figura 30 - Fixação do polipropileno no granito liso	82
Figura 31 - Pesagem das fibras e matriz.....	83
Figura 32 - Pesagem da resina e catalisador.....	83
Figura 33 - Fase inicial de preparação do compósito.....	84
Figura 34 - Primeira camada de resina epóxi.....	84
Figura 35 - Primeira camada de fibra de vidro, segunda camada de resina epóxi, aplicação da matriz de PET e terceira camada de resina	85
Figura 36 - Posicionamento da segunda camada de tecido de vidro, quarta camada de resina, posicionamento do polipropileno, e adição de peso sobre o laminado.....	86
Figura 37 - Corpos de prova para ensaios de tração	87
Figura 38 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de tração.....	87
Figura 39 - Corpos de prova para ensaio de flexão	88
Figura 40 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de flexão	88
Figura 41 - Corpos de prova para ensaio de impacto (a). Máquina de fazer entalhes (b).	89
Figura 42 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de impacto	89
Figura 43 - Análise termogravimétrica TGA no equipamento STA 449F3 da NETZSCH	90
Figura 44 - Fluxograma da fase de projeto preliminar.....	91
Figura 45 - Corte especial das folhas de PET	93
Figura 46 - Tiras fixadas no dispositivo de madeira	93
Figura 47 - Folha e PET preparada no sentido longitudinal	94
Figura 48 - Matriz de PET para fabricação da telha	95
Figura 49 - Caixote do molde inferior	96

Figura 50 – Trama de vergalhão para fabricação dos moldes	97
Figura 51 - Caixaote do molde inferior com alça	97
Figura 52 - Molde inferior pronto para receber o concreto	98
Figura 53 - (a) Mistura do concreto. (b) molde inferior cheio de concreto.	98
Figura 54 - Preparação dos materiais para laminação da telha de PET	99
Figura 55 - Execução do ensaio de tração	116
Figura 56 - Macro aspecto dos corpos de prova de tração após o ensaio realizado	117
Figura 57 - Corpos de prova de PVC após ensaio de tração	120
Figura 58 - Execução do ensaio de flexão	122
Figura 59 - Ensaio visual dos corpos de prova após ensaio de flexão.....	123
Figura 60 - Execução do ensaio de impacto	128
Figura 61- Ensaio visual dos corpos de prova após ensaio de impacto Izod .	129
Figura 62 - Projeto 3D da telha	138
Figura 63 - Moldes acoplados	139
Figura 64 - Resultado final dos moldes para laminação do compósito	139
Figura 65 - Protótipo da telha	140
Figura 66 - Inspeção visual do protótipo	141
Figura 67 - Teste de carga estática sendo realizada no protótipo.....	142
Figura 68 - Teste de carga estática com apoios sendo realizada no protótipo	143
Figura 69 - Teste de carga estática com apoios e redução de área de contato sendo realizada no protótipo	144
Figura 70 - Teste de carga dinâmica com apoios sendo realizada no protótipo	144

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico de Gantt – (a) planejamento do projeto, (b) Planejamento do projeto conceitual, (c) Planejamento do projeto preliminar.....	100 e 100
Gráfico 2 - Resultados dos ensaios de tração nos corpos de prova do material compósito.....	118
Gráfico 3 - Resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova da telha de PVC.....	121
Gráfico 4 - Resultados dos ensaios de flexão nos corpos de prova do material compósito.....	124
Gráfico 5 - Resultados dos ensaios de flexão até o limite elástico dos corpos de prova do material compósito.....	126
Gráfico 6 - Resistência ao impacto dos corpos de prova do material compósito.....	131
Gráfico 7 - Curvas TGA das amostras do compósito com matriz de PET reforçado com fibra de vidro e resina epóxi.....	133
Gráfico 8 - Curva DTGA das amostras do compósito de PET reforçado com fibra de vidro e resina epóxi.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais.....	51
Tabela 2 - Resultados de resistência a flexão do PET e PP	55
Tabela 3 - Valores da tenacidade à fratura em deformação plana e da resistência à temperatura ambiente	58
Tabela 4 - Diferenças entre os ensaios de impacto Charpy e Izod	58
Tabela 5 - Atributos necessários para o desenvolvimento do produto	109
Tabela 6 - Códigos de referência para os tipos de telhas e suas geometrias adotadas	110
Tabela 7 - Triagem de concepções adotando a matriz de Pugh	111
Tabela 8 - Módulos de elasticidade encontrados para os corpos de prova de tração	117
Tabela 9 - Tensões axiais e de cisalhamento calculadas para os corpos de prova submetidos a flexão	125
Tabela 10 - Tensões axiais e de cisalhamento máximas calculadas para os corpos de prova submetidos a flexão até a região de resiliência	127
Tabela 11 - Resultados para os ensaios de impacto realizados nos corpos de prova do compósito	130
Tabela 12 - Massa relativa aos materiais presentes na laminação dos compósitos	132
Tabela 13 - Temperaturas de degradação dos laminados L1, L2 e L3	135

LISTA DE SIGLAS

3D – Três Dimensões

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do Pet

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATR – Reflexão Total Atenuada

BIF's – Resíduo Arenoso de Formação Ferrífera Bandada

BV – Borracha Vulcanizada

CAD – Desenho Assistido por Computador

DSC – Differential Scanning Calorimetry

DTGA – Derivada da curva termogravimétrica

ES – Espírito Santo

EUA – Estados Unidos da América

GEPET – Gesso e Politereftalato de Etileno

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

KBr – Brometo de Potássio

MS-Project – Microsoft Project

MTT – Metiltetrazólio

NBR – Norma Técnica

NeDip – Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos

ONU – Organização das Nações Unidas

PE – Polietileno

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PET – Politereftalato de Etileno

PMI – Project Management Institute

PP – Polipropileno

PRODIP – Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos

PTFE – Politetrafluoretileno

PVC – Policlorato de Vinila

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SEPLAN – Secretária Municipal de Planejamento de Goiânia

TGA – Curva termogravimétrica

TTDF – Temperatura de Transição Dúctil-Frágil

UV – Ultravioleta

VN – Vermelho Neutro

LISTA DE SÍMBOLOS

cm – Centímetro

CO₂ – Dióxido de Carbono

Flakes – Grãos

F – Força

F_{max.} – Força máxima

h – Altura

h' – Altura Máxima

GPa – Giga pascal

J – Joule

KJ – Kilo Joule

KN – Kilo Newton

kt – Quilo Toneladas

Kv – Kilo Volt

Mesh – Malha

Mg – Miligrama

m² – Metro quadrado

min – Minutos

mL – Mililitro

mm – Milímetros

MPa – Mega Pascal

°C – Graus Celsius

ε – Deformação

σ – Tensão

τ – Tensão Cisalhante

% – Percentual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivos Gerais	25
1.2 Objetivos Específicos	26
1.3 Estrutura do Trabalho	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 Processo de Desenvolvimento do Projeto de Produto	27
2.2 Desenvolvimento de Produto	29
2.3 Materiais Poliméricos.....	33
2.4 Materiais Compósitos	35
2.5 Ensaio Mecânicos	43
2.5.1 Tração	45
2.5.2 Flexão	52
2.5.3 Impacto	55
2.6 Análise termogravimétrica.....	59
2.7 Aplicações para PET Reciclado – Estudos de Caso	61
2.7.1 Telhas de materiais reciclados	61
2.7.2 Outros produtos de PET reciclado.....	65
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
3.1 Metodologia de projeto de produto	71
3.1.1 Planejamento do projeto	73
3.1.2 Projeto informacional	74
3.1.3 Projeto conceitual.....	76
3.1.3.1 Projeto de fabricação dos corpos de prova.....	77
3.1.4 Projeto preliminar	90
3.1.4.1 Processo de fabricação da telha de PET.....	91
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	100
4.1 Resultados do planejamento do projeto	100
4.1.1 Lições aprendidas	101
4.2 Resultados do projeto informacional	102
4.2.1 Lições aprendidas	107
4.3 Resultados do projeto conceitual	109

4.3.1	Concepções alternativas	110
4.3.2	Concepção selecionada	111
4.3.3	Propriedades mecânicas	115
4.3.3.1	Resistência à Tração	116
4.3.3.2	Resistência à Flexão	121
4.3.3.3	Resistência ao Impacto	127
4.3.4	Propriedades térmicas	131
4.3.4.1	Análise termogravimétrica	131
4.3.5	Lições aprendidas	135
4.4	Resultados do projeto preliminar	137
4.4.1	Lições aprendidas	145
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	147
	REFERÊNCIAS	149
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	155
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO	160
	APÊNDICE C – CURVAS TGA E DTGA	163
	APÊNDICE D – DESENHO DO PROTÓTIPO	166

1 INTRODUÇÃO

O termo “sustentabilidade” vem sendo utilizado a cada dia mais nos ambientes acadêmicos, industriais, políticos e ambientais, seja nas esferas econômica, social ou cultural. A sustentabilidade está diretamente relacionada a um conceito de desenvolvimento sustentável, que, por sua vez, compõe um aglomerado de estratégias, opiniões e ações ecologicamente corretas, economicamente viáveis, socialmente justas e culturalmente diversas.

A definição clara de desenvolvimento sustentável surgiu após a Segunda Conferência Mundial da ONU, em 1984, através da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente, como sendo “aquele que atende às necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas necessidades e aspirações”, tornando esta definição uma referência clássica aceita por quase toda a literatura que trata a respeito deste tema (ALMEIDA, 2009).

A utilização de fontes de energia renováveis, a preservação de áreas verdes e ambientes marinhos, a racionalização e o controle da exploração de recursos minerais, a economia do consumo de água, a prática da coleta seletiva e sua reciclagem para o desenvolvimento de produtos renováveis são alguns exemplos de ações que contribuem para garantir a sobrevivência dos recursos naturais do planeta, bem como o desenvolvimento de soluções ecológicas que contribuam na prática para o desenvolvimento sustentável.

Na contramão destas ações está a geração de resíduos, que é uma das principais consequências dos modelos e padrões de consumo adotados pela sociedade atual. Esta questão está fortemente ligada à utilização de compostos plásticos, que claramente nos proporcionam uma gama de avanços e benefícios, já que estes materiais apresentam a grande vantagem de associar resistência e capacidade de usos múltiplos e baixos custos (ANDRDY E NEAL, 2009).

Contudo, apesar de várias vantagens relacionadas principalmente à facilidade e flexibilidade dos usos de materiais plásticos, o cenário atual também remete aos diversos problemas que estes materiais proporcionam, sobretudo nos ambientes marinhos, como, por exemplo, a resistência à degradação e a capacidade de adsorção de contaminantes nocivos à saúde da vida marinha e,

indiretamente, à saúde humana apresentados por estes materiais (PEREIRA, OLIVEIRA E TURRA, 2011).

Devido à baixa degradação, o plástico permanece no ecossistema por longos anos, evidenciando um grande volume de lixo que vem se acumulando nas últimas décadas (HOPEWELL et al, 2009). Há muito tempo vários grupos ambientalistas vêm destacando que os materiais plásticos descartados no mar representam uma das maiores ameaças ao meio ambiente, visto que aproximadamente 90% do lixo nos oceanos é composto por plásticos (BARNES et al, 2009).

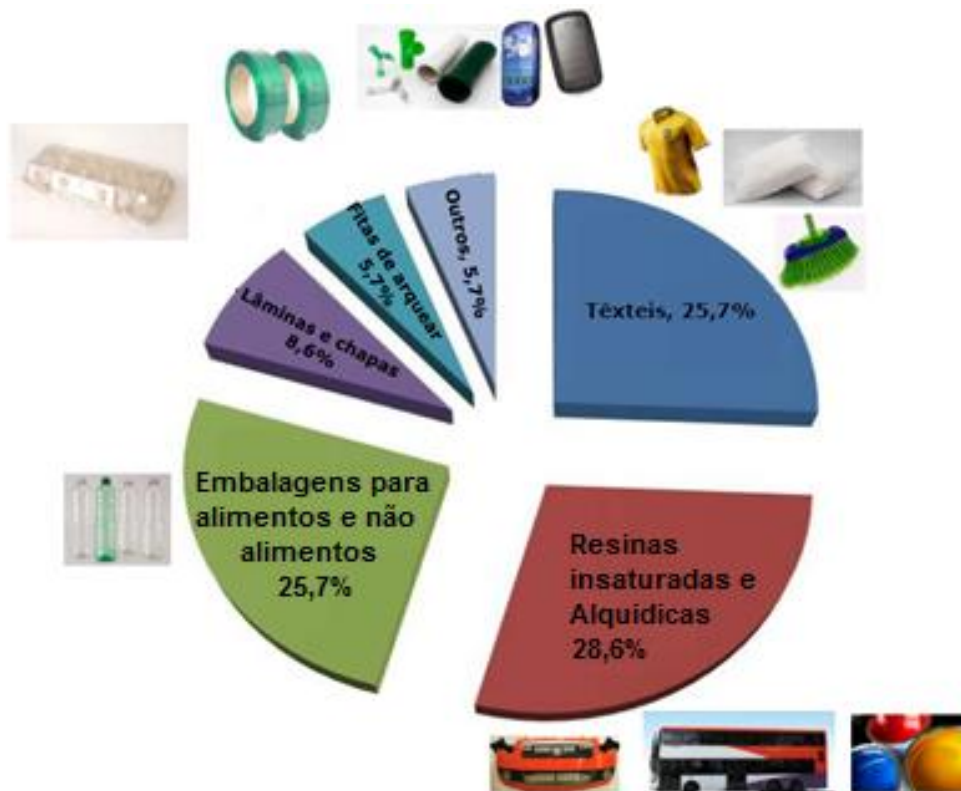
Além disso, a geração de resíduos sólidos se apresenta como um dos principais problemas ambientais enfrentados especialmente nos grandes centros urbanos, trazendo uma ameaça principalmente à saúde pública e aos recursos naturais (SALAMONI; PINHEIRO; NUMMER, 2009). As proporções encontradas na literatura em relação à geração de lixo urbano ficam em torno de 65% de matéria orgânica e 35% de resíduos sólidos, sendo que destes, 43% são de papel/papelão; 20% são de plásticos; 5,5% de vidros; 8,5% de metais e 23% de outros materiais considerados de baixo potencial de reciclabilidade (madeira, borracha, couro, etc.), ou com potencial poluidor (pilhas, baterias e lâmpadas fluorescentes) (GALBIATI, 2012).

Estes 20% de plásticos derivados da geração de resíduos sólidos no Brasil superam os 3 milhões de toneladas por ano, e este número só aumenta, à medida em que a industrialização dos produtos aumenta. Em um levantamento realizado por Spinacé e De Paoli (2005), foi verificado que os plásticos mais encontrados nos resíduos sólidos urbanos são o polietileno (PE), com aproximadamente 35%; o polipropileno (PP), com cerca de 10%; o poli tereftalato de etileno (PET), em torno de 20% e o poli clorato de vinila (PVC), próximo a 20%.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria do PET – ABIPET (2016), cerca de 51% de todo volume de resíduos PET produzidos no Brasil são reciclados, o que equivale a aproximadamente 331kt por ano. Além disso, o Brasil é o país que produz a maior variedade de produtos derivados da reciclagem do PET, sendo que dentre estes, os mais representativos são os produtos destinados à indústria têxtil, às embalagens e à fabricação de resinas insaturadas e alquídicas utilizadas principalmente na fabricação de tintas

industriais destinadas majoritariamente à indústria automotiva, conforme identificou-se na Figura 1.

Figura 1 - Usos finais para o PET reciclado no Brasil



Fonte: Adaptado de ABIPET (2016)

Diante disso, o Brasil apresenta um grande potencial para aumentar a exportação de PET reciclado, visto que o país recicla cerca de 51% das garrafas produzidas com tal material. Por ser uma referência no que tange à variação de produtos derivados do PET reciclado, o Brasil se destaca no mercado internacional. Contudo, é necessário aumentar o índice de produto PET reciclado, sendo que para isso é importante a mobilização da iniciativa privada na movimentação de investimentos e recursos ao setor, bem como do governo em fortalecer campanhas que incentivem o mercado no Brasil, além de conscientizar a população sobre o papel fundamental da reciclagem, coleta seletiva e preservação ambiental (SANTOS *et al*, 2015).

O PET é considerado um polímero termoplástico derivado do petróleo, com grande relevância comercial por apresentar boas propriedades mecânicas e um baixo custo, tendo uma ampla variedade de aplicações. A busca por

alternativas à destinação final do PET tem se tornado mais frequente, já que houve um aumento significativo da produção mundial do referido material, podendo acarretar sérios danos ambientais caso seja feita uma disposição incorreta deste produto, uma vez que ele leva muito tempo para se decompor. A reciclagem do PET é uma maneira de amenizar os problemas ambientais causados pela disposição incorreta do poli tereftalato de etileno no meio ambiente (AL-SABAGH *et al*, 2016; PAYÁN *et al*, 2017; YUE *et al*, 2011; ZHANG e WEN, 2014).

Segundo a ABIPET (2016), a indústria de reciclagem do PET no Brasil é economicamente viável, sustentável e funcional. Cerca de um terço do faturamento de toda a indústria brasileira do PET provém da reciclagem, gerando impostos, empregos, renda e todos os demais benefícios de uma indústria de base sólida. Seu crescimento anual constante, em média superior a 11% desde 2000, permite planejar novos investimentos – incrementados e incentivados pela criação de novos produtos para o PET reciclado.

Não bastasse o reaproveitamento de centenas de milhares de toneladas de embalagens que seriam indevidamente destinadas, ocasionando graves problemas ambientais, a reciclagem de PET economiza recursos naturais, além de muita água e energia. A matéria-prima reciclada substitui material virgem em muitos outros produtos, nos segmentos mais variados, tais como construção civil, tintas, produção de automóveis e caminhões ou telefones celulares.

Estudos que avaliaram os efeitos da reciclagem do PET no meio ambiente foram realizados em 2017 em um aterro sanitário no município de Valle del Cauca, na Colômbia. O estudo utilizou sistemas de modelagem dinâmica, sendo que as variáveis de consumo de água e energia, geração de CO₂ e o tempo de vida do aterro foram confrontadas com a variação da taxa de reciclagem de PET. Os resultados obtidos indicaram que o aumento da taxa de reciclagem de PET diminui significativamente o consumo de água e energia, bem como a emissão de CO₂ e, paralelamente, aumenta o tempo de vida útil do aterro (VALDERRAMA OCORÓ *et al*, 2018).

No Brasil, diversos trabalhos foram realizados visando obter uma aplicabilidade maior para o material PET reciclado, uma vez que ainda não é permitido o seu uso no armazenamento de produtos alimentícios. A maioria das pesquisas está voltada para estudos de viabilidade técnica e desenvolvimento

de novos produtos, como citado por Mancini *et al* (1998); Gonçalves e Fornari (2012); Jaramillo *et al* (2014) e Da Silva, Lins e Cotting (2019).

Um estudo detalhado até o quinto ciclo sucessivo de moldagem por injeção de reciclagem de PET moído pós consumo foi realizado para avaliar a influência dos ciclos de reciclagem em relação às propriedades mecânicas, fluidez, cristalinidade, degradação e produtividade após o processamento, ou seja, sua reciclabilidade a partir da influência de múltiplas injeções. Após cada ciclo, foram avaliadas as propriedades mecânicas através de ensaios de tração e impacto, bem como cristalinidade, densidade, fluidez e caracterização química. O processo mostrou-se altamente produtivo, com níveis aceitáveis até o quarto nível de reciclagem, tendo havido aumento da degradação, da cristalinidade e do módulo de Young, enquanto a ductilidade¹ reduziu progressivamente até o quinto ciclo de reciclagem (MANCINI *et al*, 1998).

Visando o reaproveitamento do resíduo de PET, um estudo realizado em 2012 a partir de corpos de prova de matriz pura e com 5 e 10% do polímero nas granulometrias de 40, 60 e 80Mesh, avaliou a influência da variação do PET nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster. O comportamento mecânico foi avaliado através de ensaios de flexão variando os valores percentuais de adição de material PET. Os resultados convergiram na viabilidade técnica da utilização dos compósitos produzidos com matriz de resina poliéster ortoftálica com adição de PET reciclado. Foi observado que os melhores resultados foram obtidos em granulometrias menores, pois as pequenas partículas apresentam maior área de contato relativa, favorecendo uma melhor ligação com o polímero (GONÇALVES; FORNARI, 2012).

A utilização de PET em substituição a materiais leves convencionalmente utilizados no nivelamento ou substituição de solos foi avaliada em 2014, por meio da execução de uma caracterização mecânica unitária e coletiva dos recipientes de PET mais comumente utilizados no mercado. Os resultados constataram que os recipientes de PET apresentaram resistência à compressão, além de apresentarem resistência química à ação de agentes externos médios, atribuindo excelente durabilidade, sendo, portanto,

¹ É uma das diversas propriedades mecânicas dos metais, que lhe confere a qualidade de suportar a maleabilidade de um material a ponto de se deformar sem se romper.

uma alternativa a ser aplicada a materiais de reposição, iluminação e nivelamento em grandes áreas de construções leves (JARAMILLO *et al*, 2014). O maior volume de PET pós consumo comercializado no Brasil ainda é fornecido em *flakes* com granulometria entre 3 e 9mm. Da Silva, Lins e Cotting (2019) desenvolveram um processo de moagem das garrafas PET que fornece *flakes* com granulometrias abaixo de 0,3mm, amplificando ainda mais a aplicabilidade deste material, já que as propriedades do polímero foram mantidas após o processamento.

Tendo em vista o potencial de crescimento da indústria do PET no Brasil e os avanços obtidos através dos inúmeros estudos, é importante continuar a contribuir com as pesquisas nesta área, a fim de seguir a promoção e o fomento do desenvolvimento de novos produtos gerados a partir da reciclagem do PET, de modo a contribuir para um desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento de um novo produto não necessariamente está relacionado à criação de produtos originais, já que novos produtos podem ser obtidos através de melhorias e modificações de produtos já existentes. Para desenvolver um produto com eficiência e eficácia, é necessário saber o que fazer; para quem fazer; quando fazer; com quem fazer e como fazer (BACK *et al*, 2008).

Diante deste contexto, pergunta-se como desenvolver uma telha de PET reciclado tecnicamente viável para contribuir com o desenvolvimento sustentável. Neste trabalho busca-se atender a esta demanda, utilizando como ferramenta metodológica o desenvolvimento integrado de produto, propendendo para a redução do acúmulo de resíduos sólidos gerados pelo meio urbano cotidianamente.

1.1 Objetivos Gerais

- Desenvolver o protótipo de uma telha de PET tecnicamente viável através do reaproveitamento de resíduos sólidos derivado de garrafas de refrigerante.

1.2 Objetivos Específicos

- Planejar e monitorar os projetos para o desenvolvimento do produto;
- Desenvolver um projeto informacional do produto;
- Desenvolver um projeto conceitual do produto;
- Desenvolver um novo compósito utilizando PET reciclado;
- Obter a caracterização mecânica deste compósito;
- Desenvolver um projeto preliminar do produto;
- Produzir um protótipo de telha com material compósito de PET reciclado.

1.3 Estrutura do Trabalho

O estudo será dividido em 5 capítulos fundamentais.

No capítulo 1, pode-se encontrar as principais motivações do trabalho, objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2, são apresentados alguns fundamentos do processo de desenvolvimento de produtos; aspectos sobre materiais poliméricos; teoria sobre ensaios mecânicos de materiais e alguns estudos de caso que envolvem reciclagem de PET. O principal objetivo deste capítulo é o de fornecer embasamento teórico para o desenvolvimento da telha de PET.

No terceiro capítulo serão apresentados os materiais e métodos que culminarão na fase de planejamento do projeto, seguidos pelo projeto informacional, conceitual e o projeto preliminar, que fecha o capítulo.

Os resultados e discussões serão estabelecidos no capítulo 4.

Por fim, o capítulo 5 se refere às conclusões e recomendações para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o intuito de descrever uma revisão dos principais assuntos relacionados aos objetivos descritos deste trabalho, iniciar-se-á com o levantamento de alguns aspectos e características gerais do processo de desenvolvimento do projeto de produtos, seguindo-se pela conceituação da metodologia de desenvolvimento integrado de produtos. Mais adiante, será abordado brevemente sobre a concepção de materiais poliméricos, bem como sobre ensaios mecânicos dos materiais. No fim, serão apresentados alguns estudos de caso de trabalhos relacionados à reciclagem de PET.

2.1 Processo de Desenvolvimento do Projeto de Produto

O termo “processo de desenvolvimento” pode ser compreendido como um recurso e/ou uma atividade que se constitui de início, meio e fim, onde cada etapa destina-se à execução de um conjunto de decisões definidas por entradas, as quais são processadas, gerando uma saída denominada como resultado (CASAROTTO FILHO; FÁVERO, 2006).

Para Back *et al* (2008, p. 5), o termo “projeto do produto” pode ser descrito como “um plano de empreendimento a ser realizado – um produto, com o fim de atender a uma necessidade”. Paralelamente, o PMI (2008) define que as etapas de cada projeto são identificadas como fases, as quais, por sua vez, são subdivididas em tarefas que têm por finalidade subsidiar a equipe de projeto na tomada de decisão, afirmando, ainda, que o número de tarefas de um processo de desenvolvimento é atribuído mediante a complexidade que cada projeto apresenta.

O produto é constituído de elementos que formam um conjunto de atributos básicos, tais como: aparência; forma; cor; função; imagem; material; embalagem; marca; serviços pós-venda; e garantias. Basicamente, o desenvolvimento de um produto consiste no processo de transformação necessárias para a identificação da demanda, a produção e o uso do produto (BACK *et al* (2008).

Um produto não consiste simplesmente em fabricar algo de maneira aleatória ou de acordo com a própria vontade, uma vez que existem etapas a serem executadas e processos a serem cumpridos antes de se obter um produto final de fato, que tenha qualidade e competitividade no mercado. Para Back *et al*

(2008), a competitividade dos produtos depende de fatores como escopo; custo; tempo de lançamento e qualidade do produto.

Um novo produto não obrigatoriamente consiste em inovação ou um material inédito, já que ele pode ser considerado uma melhoria ou uma alteração na forma ou no material, por exemplo. Back *et al* (2008) classificam os novos produtos em:

- Variantes de produtos existentes: como o próprio nome já diz, são novos produtos criados a partir de produtos já existentes no mercado, podendo ser caracterizados por extensões da linha produtiva, novos formatos ou novas embalagens, ou até melhorias realizadas no produto. Exemplo: o desenvolvimento de uma nova embalagem de refrigerante;
- Inovativos: necessitam de maior tempo dedicado à pesquisa e desenvolvimento. Estes produtos são gerados a partir de modificações feitas em produtos existentes, as quais geram um alto valor agregado a ele. Exemplo: o desenvolvimento de um refrigerante sem açúcar;
- Criativos: requerem um tempo longo dedicado à pesquisa e desenvolvimento. Estes produtos geralmente são inexistentes no mercado, razão pela qual podem ser considerados de alto risco; em contrapartida, podem gerar novos paradigmas e influenciar o desenvolvimento de novos campos industriais. Exemplo: o desenvolvimento de um refrigerante em pó.

Todo produto, ao ser elaborado, passa por um ciclo de vida completo, que se inicia no planejamento, passando pelas definições das especificações de projeto; em seguida, desenvolve-se o projeto do produto, para então desenvolver o projeto do processo de fabricação e montagem, seguido pela etapa de construção e teste do protótipo, e, por fim, é elaborado o planejamento do processo de transporte, manutenção e descarte. Este ciclo é denominado “processo de desenvolvimento de produto” (BACK *et al*, 2008).

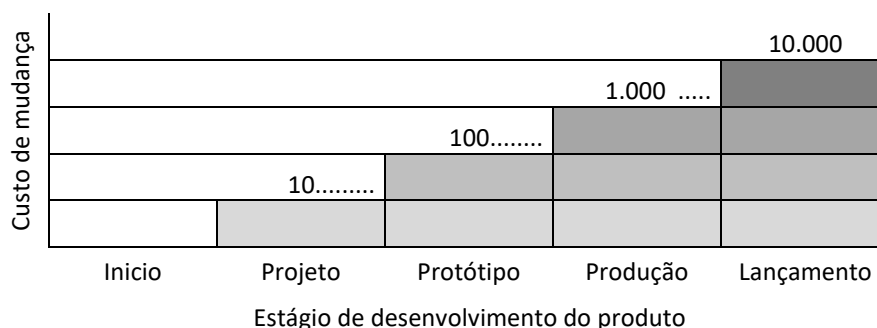
Portanto, o processo de desenvolvimento de projeto do produto está basicamente relacionado a um conjunto de informações que vão se complementando e tomando forma por meio de algumas atividades que transitam desde a identificação da oportunidade de negócio até a inclusão de um novo produto no mercado (ROMANO, 2003; BACK *et al*, 2008).

2.2 Desenvolvimento de Produto

A prática de desenvolvimento de produtos aplicando-se um método sistemático surge a partir da necessidade de produção em larga escala, tendo maior ênfase a partir de 1980, quando as discussões sobre o tema se acaloraram em virtude de alguns estudos realizados, que identificaram que as principais razões para perda da competitividade dos produtos se dava em virtude de projetos mal elaborados (BACK *et al*, 2008).

Os estudos na área de desenvolvimento de produtos surgiram principalmente nos EUA, Inglaterra e Alemanha. Huthwaite e Schneberger (1992) justificaram a importância de se aplicar métodos sistemáticos no desenvolvimento de produtos, sendo que a Figura 2 estabelece claramente que havendo necessidade de se realizar alguma alteração no produto na fase inicial do desenvolvimento, o custo é baixo; contudo, à medida que o projeto avança, o custo para se realizar alguma alteração aumenta dez vezes em relação à fase anterior.

Figura 2 - Efeito da escala de custos de mudanças do produto nas diversas fases de desenvolvimento.



Fonte: Adaptado de Huthwaite e Schneberger (1992)

Ullman (1992) atribuiu cerca de 80% dos problemas com produtos novos à elaboração de um projeto deficiente. Duffy *et al* (1993) apontaram que aproximadamente 80% do custo de desenvolvimento de um produto é derivado do seu projeto, determinando-se, assim, a importância de se sistematizar o desenvolvimento do projeto de um produto.

Em termos gerais, reconhece-se hoje que as decisões tomadas nas fases iniciais do projeto têm um efeito significativo na manufaturabilidade do produto, em sua qualidade, nos custos de produção, além de outros fatores (BACK *et al*, 2008), decorrendo daí a necessidade de concentrar esforços na

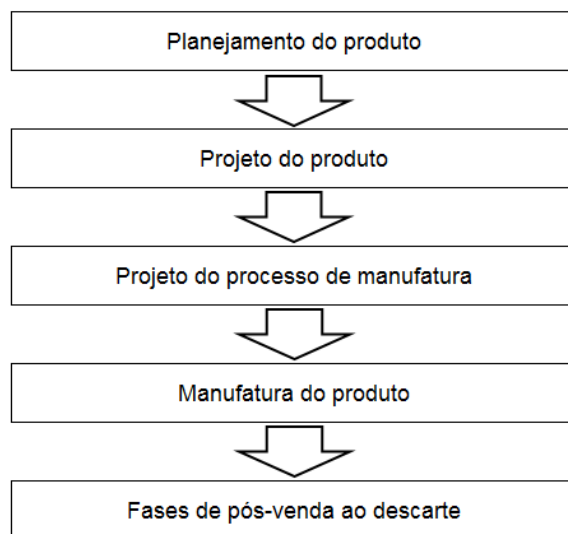
fase inicial de elaboração do projeto do produto. Neste aspecto, a ideia de se trabalhar de forma integrada no desenvolvimento de um produto, buscando preencher todas as lacunas e deixar o escopo do projeto bem definido, pode ser alcançada com a prática da engenharia simultânea.

O termo “engenharia simultânea” pode ser associado à metodologia de desenvolvimento integrado de produtos, pela qual algumas fases do processo de desenvolvimento ocorrem de forma simultânea, iniciando algumas atividades da fase posterior antes da conclusão das atividades da fase anterior. Isso normalmente ocorre quando o projeto possui um certo risco e as atividades da fase seguinte não dependem exclusivamente dos resultados da fase anterior (BERGAMO, 2014).

O desenvolvimento de projetos de produtos mais complexos sem adotar uma metodologia é inadmissível na atual conjuntura. Do mesmo modo, mostra-se imprescindível a capacitação dos profissionais que irão atuar nas equipes de desenvolvimento, simplificando a sistematização do uso das metodologias como ferramentas para o desenvolvimento de novos produtos (BACK *et al*, 2008).

A seguir, é destacado o modelo de desenvolvimento de produtos apresentados sob a ótica de Nelson Back, um dos propulsores do Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP) no Brasil através do Núcleo de Desenvolvimento de Produtos (NeDIP). Back *et al* (2008) resumem genericamente o processo de desenvolvimento de produto em cinco fases, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 - Fases do desenvolvimento de produtos



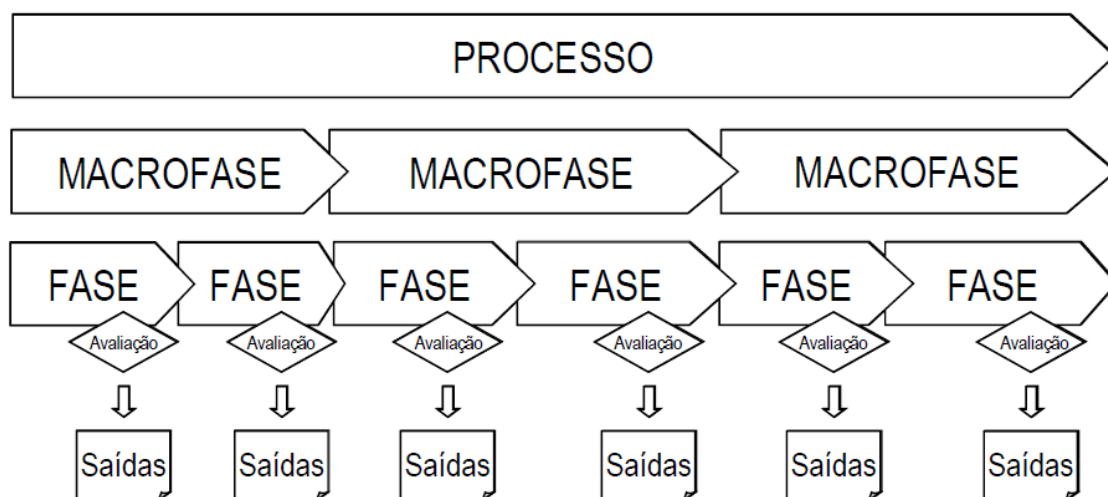
Fonte: Back et al (2008)

Dentre as principais estruturas de projeto de produtos destacam-se: Asimov (1962), com três fases de projeto e quatro fases de planejamento e pós-venda; Woodson (1966), com quatro fases, sendo elas: viabilidade de projeto, projeto preliminar, projeto detalhado e revisão de projeto; Coryell (1967), com doze passos para o processo do projeto, destacando cinco pontos de revisão que culminam com os requisitos de projeto; Pahl e Beitz (1977), com quatro fases, sendo estas: definição da tarefa, desenvolvimento da concepção, projeto preliminar e projeto detalhado (BACK *et al*, 2008).

Através do NeDIP, Romano (2003) descreveu e desenvolveu o detalhamento do modelo de desenvolvimento integrado de produtos que apresenta características de modelos de referência antecessores unificados à ideia de etapas que podem ser desenvolvidas mutuamente. Este modelo, denominado “modelo de referência”, ilustrado na

Figura 4, permite explicitar o conhecimento sobre o processo de desenvolvimento de produtos de modo a auxiliar no entendimento e na prática do processo, vindo a ser muito utilizado, tanto para implementação de melhorias no desenvolvimento de produtos das empresas, quanto para a formação de estudantes e profissionais da área (BACK *et al*, 2008).

Figura 4 - Representação genérica do modelo de referência



Fonte: Romano (2003)

Para Romano (2003), o modelo de desenvolvimento integrado de produtos possui três macrofases, sendo a primeira de planejamento do projeto, que envolve a elaboração do plano de projeto do produto, sendo este o principal

resultado da fase. A segunda macrofase constitui a elaboração do produto e o plano de manufatura, sendo dividida em 4 fases, quais sejam:

- Primeira fase: é o projeto informacional, obtendo como resultado principal desta fase as especificações do projeto;
- Segunda fase: é o projeto conceitual, onde a concepção do projeto caracteriza o principal resultado desta fase;
- Terceira fase: é o projeto preliminar, onde a viabilidade técnica e econômica do projeto é tida como resultados principais desta fase;
- Quarta fase: é o projeto detalhado, onde é elaborado toda a documentação referente ao produto obtido nas fases anteriores, sendo que esta documentação constitui o principal resultado desta fase.

A terceira macrofase é a implementação do lote piloto, que envolve a execução do plano de manufatura na produção da empresa e o encerramento do projeto. É dividida em três fases, sendo elas:

- Primeira fase: é a preparação da produção, tendo como principal resultado desta fase a liberação do produto;
- Segunda fase: é o lançamento do produto, onde o lote piloto será liberado, sendo que essa liberação é tida como o principal resultado da fase;
- Terceira fase: é a validação do produto - nesta última fase, o principal resultado é a realização da validação do produto.

Deste modo se constitui o processo de desenvolvimento integrado do produto: três macrofases transformadas em oito fases, sendo que ao final de cada fase existe uma avaliação (ROMANO, 2003). A Figura 5, a seguir, ilustra o modelo de desenvolvimento integrado de produtos.

Figura 5 - Representação gráfica do modelo do processo de desenvolvimento integrado de produtos



Fonte: Adaptado de Romano (2003)

2.3 Materiais Poliméricos

Os polímeros são compostos de origem natural, sintética ou semissintética, constituídos pela repetição de *monômeros* que se formam através de reações químicas, daí a origem do termo polímero (poli – muitos; *meros* = partes). Os polímeros podem ser orgânicos ou inorgânicos, contudo, a maioria dos estudos são voltados aos polímeros orgânicos, principalmente pelo fato de serem comercialmente mais importantes (AKCELRUD, 2007).

Os polímeros naturais são os que podem ser obtidos diretamente da natureza, como é o caso do látex, da celulose e do algodão. Os semissintéticos, ou também conhecidos como artificiais, são obtidos através de reações químicas a partir de polímeros naturais, como é o caso da caseína. Já os polímeros sintéticos são os produzidos exclusivamente por reações de transformação, como reações químicas, por exemplo (FERREIRA, 2017).

Os polímeros sintéticos, por sua vez, são classificados em elastômeros, termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos sofrem amolecimento ao serem submetidos a uma elevação de temperatura e são endurecidos quando resfriados. Estes processos são reversíveis e podem ser realizado repetidas vezes, e por isso os termoplásticos são considerados recicláveis. Os principais polímeros termoplásticos são o polietileno (PE); o poliestireno (PS); a poliamida (Náilon); o polipropileno (PP); o poli cloreto de vinila (PVC) e o polietileno tereftalato (PET) (COSTA, 1998; CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

Já os termofixos são rígidos e apresentam uma estabilidade dimensional maior que os termoplásticos, bem como grande estabilidade a variações de temperaturas, contudo, são mais frágeis e não são recicláveis. Os principais polímeros termofixos são a baquelite; resina epóxi e resina ureia-formol (CANEVROLO, 2006)

Os elastômeros são uma classe intermediária entre os termoplásticos e os termofixos, apresentando baixo módulo de elasticidade e não são fundíveis, mas apresentam alta elasticidade, não sendo rígidos como os termofixos. Pela sua incapacidade de fusão, sua reciclagem torna-se complicada. Os elastômeros devem aceitar grandes deformações (>200%), mantendo boa resistência mecânica e módulo de elasticidade quando deformados; recuperar rapidamente

a deformação, após retirado o esforço; ter recuperação total da deformação. A borracha vulcanizada (BV) é o principal exemplo de elastômero (CANEVROLO, 2006).

A maneira como os polímeros respondem às solicitações mostram suas propriedades mecânicas. Referida resposta depende de alguns fatores, como estrutura química; temperatura; tempo e condições de processamento do polímero. Os polímeros podem apresentar dois mecanismos de deformação: a deformação elástica – consiste em um processo reversível onde a Lei de Hooke pode ser aplicada, ou seja, a deformação é proporcional à força aplicada; e a deformação plástica – consiste em uma deformação permanente, ou seja, o processo é irreversível e ocorre após aplicação de uma força sobre um material.

As propriedades mecânicas utilizadas para caracterização dos polímeros são basicamente as mesmas dos materiais metálicos (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Conforme a aplicação, pode-se ou não considerar outras características mecânicas importantes aos materiais poliméricos, contudo, serão consideradas apenas a resistência à tração, à flexão e ao impacto.

Para a resistência à tração e a resistência à flexão, é realizado um ensaio de tração e flexão, respectivamente, que obtém como principais propriedades as tensões de ruptura e o módulo de elasticidade. Os resultados podem variar com a temperatura, velocidade de aplicação da carga, defeitos superficiais e geometria da seção. Como os materiais dúcteis são capazes de absorver grandes deformações, os ensaios de flexão nestes materiais não são capazes de fornecer resultados quantitativos qualificados, por isso, esta propriedade é empregada em materiais de maior rigidez (GAMA, 2017).

Assim como os metais, os polímeros podem exibir fratura dúctil ou frágil sob uma carga de impacto, a depender da temperatura, do tamanho da amostra, da taxa de deformação e do modo de aplicação da carga. Obter uma elevada resistência ao impacto, à temperatura ambiente e uma temperatura de transição dúctil frágil, que esteja abaixo da temperatura ambiente, são as principais características de impacto desejadas (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

O emprego dos polímeros em aplicações inovadoras, utilizando técnicas cada vez mais aprimoradas, está associada aos avanços realizados através dos mais variados estudos, que relacionam a estrutura às propriedades e avaliam a influência dos processos de obtenção dos polímeros com as características dos

produtos finais, já que as variáveis de cada processo interferem diretamente no seu desempenho (AKCELRUD, 2007).

2.4 Materiais Compósitos

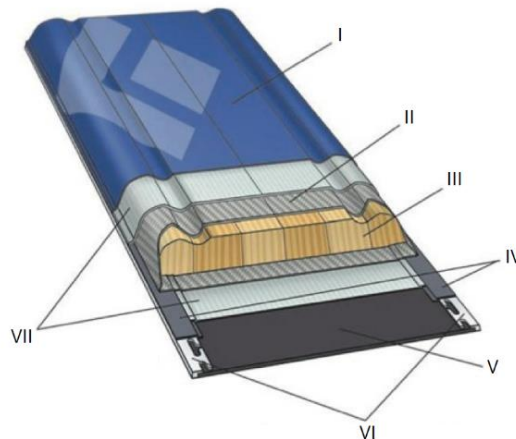
Os materiais compósitos vêm se tornando cada vez mais comuns nas indústrias e no cotidiano. Sendo amplamente versáteis, eles podem ser encontrados em veículos, aeronaves, televisores e periféricos de computadores. O aumento de sua aplicação é devido à variedade de propriedades mecânicas geradas pela combinação de dois ou mais componentes (GAMA, 2017).

Para Callister e Rethwisch (2013), os compósitos são basicamente constituídos através da combinação de dois ou mais materiais distintos, tornando-se o que chamamos de material multifásico, exibindo proporções significativas das propriedades de cada material que constitui a fase, possibilitando o princípio de ação combinada com os melhores arranjos de propriedades desejadas para o compósito em questão. A maioria dos compósitos é constituída por apenas duas fases, sendo uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, comumente chamada de fase dispersa.

A principal finalidade de utilização de compósitos se deve à possibilidade de obter um material que combine as propriedades mecânicas desejadas. A Figura 6 ilustra bem a utilização de combinações das características e propriedades de vários materiais para fabricação de um produto exclusivo e apropriado para as solicitações mecânicas desejáveis.

Neste caso, está sendo utilizada poliamida na lâmina superior (I) para evitar lascas. O núcleo da caixa de torção (III) é geralmente constituído por laminados de espuma, madeira ou colmeia, sendo envolvido por compósito reforçado com fibras de vidro, aramida ou carbono, possibilitando as características de flexão do esqui. Para absorver as vibrações, utiliza-se borracha (IV). Na base (V), emprega-se o polietileno de ultra alto peso molecular devido a seu baixo coeficiente de atrito e sua resistência à abrasão. As arestas (VI) são constituídas de aço-carbono para facilitar a realização de curvas ao cortar a neve. Além de tudo isso, ainda são utilizadas camadas de reforço feitas por compósitos reforçados com fibras de vidro para promover rigidez longitudinal (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Figura 6 - Seção transversal de um esqui de alto desempenho



Fonte: Callister e Rethwisch (2013)

Historicamente, o emprego de materiais compósitos é datado dos egípcios, que implementaram a expansão térmica da madeira a fim de adquirir melhores propriedades mecânicas de resistência e impermeabilidade para a construção civil, passando pela idade média, quando as espadas e armaduras eram produzidas por camadas sobrepostas de diferentes ligas metálicas, até a década de sessenta, em que os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos na indústria aeroespacial pelo desenvolvimento de fibras de carbono, vidro e boro, oferecendo aos desenvolvedores a oportunidade de flexibilizar os projetos estruturais. Em conjunto, os tecidos de fibra de vidro e carbono foram desenvolvidos e implementados em aeronaves militares e comerciais, assim como na indústria automotiva, permitindo uma redução em peso de até 40% de seus produtos (JONES, 1975; KAW, 2005).

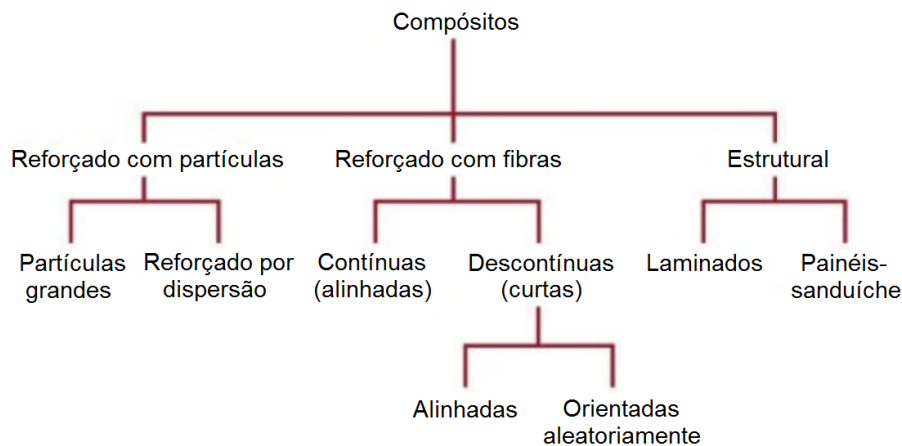
Segundo Dietz (1972), uma série de vantagens são apontadas pelo uso dos materiais compósitos, entre elas destacam-se:

- Resistência mecânica;
- Rigidez;
- Resistência à corrosão;
- Peso;
- Vida em fadiga;
- Dependência da temperatura;
- Isolamento térmico e acústico.

Seguramente, as propriedades supracitadas não são experimentadas ao mesmo tempo pelo compósito obtido, já que algumas propriedades entram em conflito com outras, como por exemplo a resistência mecânica e a vida em fadiga. Neste aspecto, fica a cargo do projetista a escolha das propriedades em função do tipo de solicitação que o material compósito irá sofrer.

Segundo Callister e Rethwisch (2013), os materiais compósitos apresentam basicamente três divisões principais: os compósitos reforçados com partículas; os compósitos reforçados com fibra e os compósitos estruturais. A Figura 7 representa um esquema simplificado para a classificação dos materiais compósitos.

Figura 7 - Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2013)

Os compósitos reforçados com partículas são basicamente subclassificados em compósitos com partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão. A grande diferença dos dois está baseada no mecanismo de reforço ou de aumento de resistência. Nos compósitos com partículas grandes não ocorrem interações partícula-matriz ao nível atômico ou molecular, e por isso recebem o termo “grandes”, enquanto os compósitos reforçados por dispersão utilizam partículas bem menores, com diâmetros variando entre 0,01 μm a 0,1 μm , e com isso, as interações partícula-matriz que levam o aumento de resistência ocorrem ao nível atômico ou molecular (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

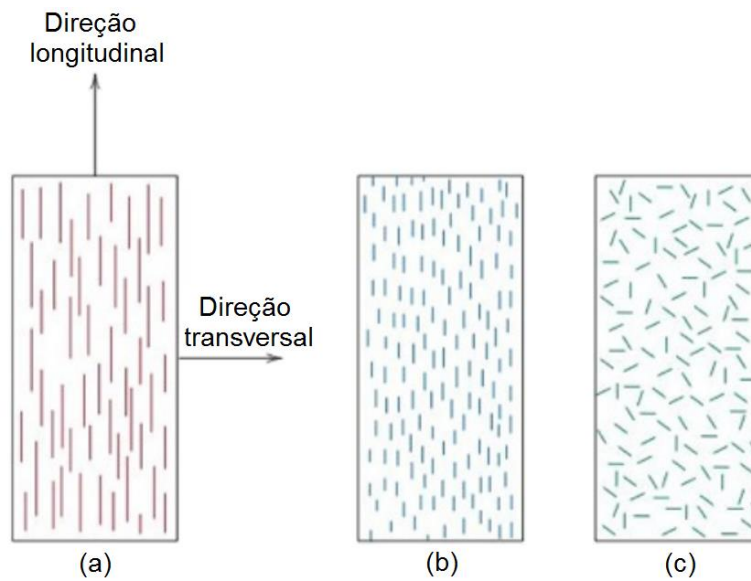
O concreto é o compósito com partículas grandes mais conhecido, composto por cimento (matriz), areia e brita (os particulados). Este compósito propriamente dito, está classificado em concreto de cimento Portland e o concreto armado. A principal diferença entre os dois é que o concreto armado é

reforçado com vergalhões, arames ou malhas de aço que são inseridos no concreto fresco e não curado, ocasionando um reforço estrutural e fazendo com que a estrutura endurecida seja capaz de suportar maiores tensões de tração, compressão e cisalhamento (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Os compósitos reforçados com fibra são vistos como mais importantes tecnologicamente. Projetos que trabalham com estes compósitos incluem, frequentemente, alta resistência e rigidez em relação ao peso. Tais características são representadas através dos parâmetros de resistência e módulo específicos, que correspondem às razões entre o limite de resistência à tração e ao peso específico e o módulo de elasticidade e o peso específico, respectivamente. Para Callister e Rethwisch (2013), o uso de materiais de baixo peso específico tanto para a fibra quanto para a matriz tem possibilitado a obtenção de compósitos com resistência e módulos específicos excepcionalmente elevados.

A concentração, distribuição e orientação das fibras presentes nos compósitos reforçados com fibras interferem significativamente sobre a resistência e outras propriedades. Quanto à orientação, estes compósitos podem ter um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção ou um alinhamento completamente aleatório. Geralmente, as fibras contínuas são alinhadas (Figura 8a), enquanto as fibras descontínuas podem ser alinhadas (Figura 8b), orientadas aleatoriamente (Figura 8c) ou parcialmente orientadas. De um modo geral, compósitos que apresentam distribuição uniforme das fibras apresentam melhores propriedades mecânicas (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

Figura 8 - Representações esquemáticas de compósitos com fibras



Fonte: Adaptado de CALLISTER e RETHWISCH (2013)

Compósitos reforçados com fibras descontínuas e orientadas apresentam uma característica relativamente resistente e rígido em uma direção; por outro lado, suas propriedades mecânicas são anisotrópicas, ou seja, dependem da direção em que são medidas. Já os compósitos reforçados com fibras descontínuas e com orientação aleatória apresentam propriedades isotrópicas, isto é, idênticas em todas as direções; em contrapartida, não existe nenhuma direção de alta resistência.

Devido às suas propriedades em temperatura ambiente, bem como a facilidade de fabricação e custo, os compósitos com matriz polimérica que são compostos por fibra como meio de reforço são os de maior utilização por serem empregados nas mais diversas aplicações. Dentre os principais compósitos com matriz polimérica, estão os compostos poliméricos reforçados com fibras de vidro, compostos poliméricos reforçados com fibras de carbono e compostos poliméricos reforçados com fibras de aramidas.

Segundo Callister e Rethwisch (2013, p. 552), “o vidro é popular como um material de reforço na forma de fibra por várias razões”:

- Ele é estirado com facilidade em fibras de alta resistência a partir do seu estado fundido;

- Ele é um material facilmente disponível e pode ser fabricado economicamente em um plástico reforçado com vidro, usando uma ampla variedade de técnicas de fabricação de compósitos;
- Como uma fibra, ele é relativamente resistente e, quando incorporado em uma matriz de plástico, produz um compósito com resistência específica muito alta;
- Quando associado a diferentes plásticos, ele possui uma inércia química que torna o compósito útil em inúmeros ambientes corrosivos.

Várias aplicações em fibras de vidro já são bem conhecidas, como por exemplo as carrocerias de automóveis e cascos de barcos; tubulações de plástico; recipientes para armazenamento e pisos industriais. A indústria automotiva está cada vez mais utilizando quantidades maiores de plásticos reforçados com fibras de vidro no intuito de reduzir o peso dos automóveis e, conseqüentemente, aumentar sua autonomia (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

Para Callister e Rethwisch (2013, p. 552), “o carbono é uma fibra de alto desempenho, sendo o reforço mais utilizado em compósitos avançados com matriz polimérica” porque:

- As fibras de carbono têm o maior módulo específico e resistência específica dentre todas as fibras de reforço;
- Elas retêm seus elevados módulos e resistência à tração mesmo sob temperaturas elevadas;
- Na temperatura ambiente, as fibras de carbono não são afetadas pela umidade ou por uma grande variedade de solventes, ácidos e bases;
- Exibem uma diversidade de características físicas e mecânicas, o que permite que os compósitos que incorporam essas fibras tenham propriedades especificamente projetadas.

As fibras de carbono são normalmente revestidas com uma cobertura protetora de epóxi, que melhora sua adesão à matriz polimérica. Atualmente, os compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono estão sendo utilizados extensivamente em equipamentos esportivos e de recreação (varas de pescar, tacos de golfe), em carcaças de motores a jato fabricadas por enrolamento

filamentar, em vasos de pressão e em componentes estruturais de aeronaves - componentes da asa e fuselagem (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

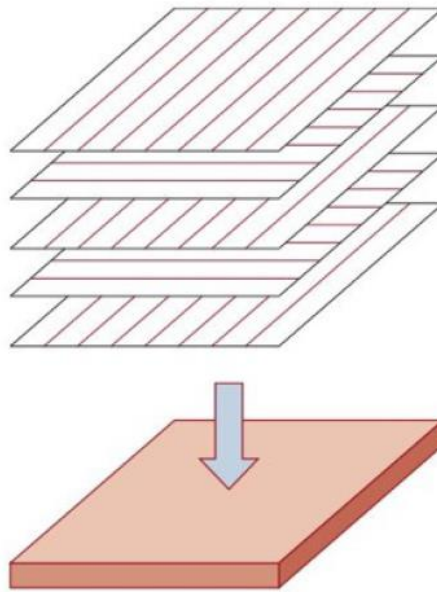
Já os compósitos reforçados com fibras de aramida são considerados materiais de alta resistência e alto módulo de elasticidade. Vêm sendo introduzidos desde a década de 70 principalmente por apresentarem excepcionais relações resistência-peso, superiores às dos metais. São utilizadas com maior frequência em compósitos de matriz polimérica, principalmente os epóxis e os poliésteres². As aplicações típicas destes compósitos com aramidas são em produtos balísticos (coletes e blindagens à prova de balas), artigos esportivos, pneus, cordas, carcaças de mísseis e vasos de pressão, além de serem utilizadas como um material substituto ao amianto em freios automotivos e em revestimentos de embreagens e gaxetas (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

Os compósitos que utilizam fibra como reforço não são limitados apenas aos compósitos com matriz polimérica, existindo ainda os compósitos com matriz metálica, que utilizam um metal dúctil para sua fabricação; os compósitos com matriz cerâmica, nos quais o reforço com fibra atribui uma melhora significativa nas propriedades relacionadas à fratura; os compósitos carbono-carbono, que são compostos por fibras de carbono inseridas em uma matriz de carbono pirolisado, ainda pouco utilizados devido ao seu alto custo; e os compósitos híbridos, que contêm pelo menos dois tipos de fibras diferentes, sendo que seu emprego possibilita projetar compósitos com melhores conjuntos gerais de propriedades (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

Por fim, os compósitos estruturais. Os dois tipos gerais mais comuns são os compósitos laminados e os painéis-sanduíche. Os compósitos laminados são virtualmente isotrópicos em um plano bidimensional. Isso é possível com o emprego de várias lâminas de um compósito altamente anisotrópico, unidas umas sobre as outras de tal modo que a direção de alta resistência varie a cada camada sucessiva, como ilustra a Figura 9 (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

² Categoria de polímeros que contêm o grupo funcional éster na sua cadeia principal. Apesar de existirem muitos poliésteres, o substantivo masculino "poliéster" como material específico refere-se ao polietileno tereftalato (PET).

Figura 9 - Empilhamento de camadas sucessivas reforçadas com fibras orientadas para formar um compósito laminado

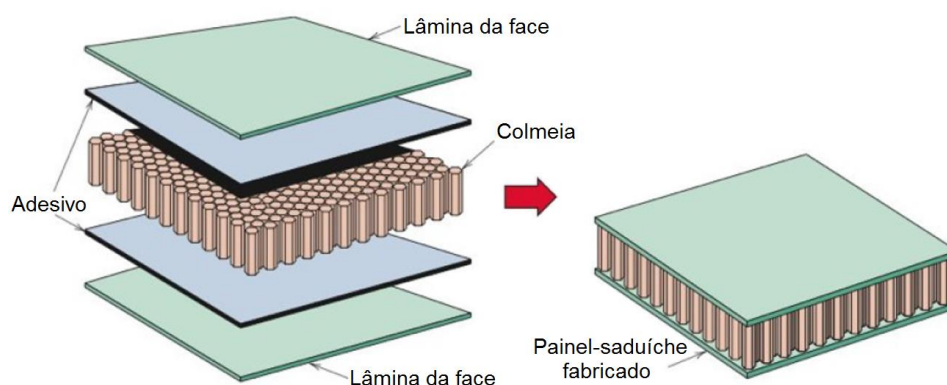


Fonte: CALLISTER e RETHWISCH (2013)

Painéis-sanduíche são considerados uma classe de compósitos estruturais projetados para serem vigas ou painéis de baixo peso, com rigidez e resistência relativamente elevadas. Um painel-sanduíche consiste em duas lâminas superficiais rígidas e resistentes que estão separadas por um material ou estrutura de núcleo. Essas estruturas combinam resistência e rigidez relativamente altas com baixa massa específica (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

Para Callister e Rethwisch (2013), o núcleo apresenta várias funções estruturais que proporcionam um suporte contínuo para as faces, com resistência suficiente ao cisalhamento e boa rigidez. É comum para esse tipo de compósito a utilização de um núcleo em “colmeia”, que consiste em folhas finas de uma liga de alumínio ou aramida moldadas com o formato de células hexagonais interligadas, com eixos orientados perpendicularmente aos planos das faces, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Diagrama esquemático mostrando a construção de um painel-sanduíche com núcleo de colmeia



Fonte: Adaptado de CALLISTER e RETHWISCH (2013)

Em função de suas características construtivas, os painéis-sanduíche são muito utilizados em telhados, pisos e paredes de prédios por atribuírem um bom isolamento térmico e acústico, com preços oscilando próximos aos do mercado comercial de concorrentes para a mesma aplicação. Além disso, são amplamente empregados nas indústrias aeroespacial e aeronáutica, utilizadas para as asas e fuselagem, bem como para os revestimentos da empenagem vertical do avião (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

2.5 Ensaios Mecânicos

A seleção de materiais presente nos projetos de engenharia busca avaliar as propriedades mecânicas desejadas para determinadas solicitações. A avaliação destas propriedades é trivial para entender o comportamento destes materiais frente ao seu regime de trabalho. De modo geral, a utilização de materiais dúcteis é preferível, uma vez que estes suportam deformação até sua ruptura, um comportamento padrão que pode ser visto como um aviso de que o material está prestes a fraturar. Esta característica não é vista nos materiais frágeis, que embora apresentem maior resistência mecânica, não indicam que estão prestes a falhar (FREDEL; ORTEGA; BASTOS, 2015).

A determinação das propriedades mecânicas de um determinado material pode ser realizada por meio de vários ensaios mecânicos, que podem ser destrutivos ou não destrutivos. Os destrutivos são ensaios que promovem a ruptura ou a inutilização do material, enquanto os não destrutivos são ensaios

utilizados para determinação de algumas propriedades físicas do material, bem como para detectar falhas internas (SOUZA, 1982).

Um ensaio mecânico consiste em carregar um corpo de prova de geometria padrão com esforços controlados. Estes esforços podem gerar tensões internas trativas, compressivas, cisalhantes ou uma combinação destas. O carregamento pode ser feito em uma direção apenas, no caso de ensaios uniaxiais; em duas direções, no caso de ensaio biaxial; ou então nas três direções do material para ensaios tri axiais. Medindo os esforços envolvidos, podem ser obtidas curvas de tipo de força/deslocamento ou, mediante medições apropriadas das 3 dimensões do corpo de prova ao longo do ensaio, a curva tensão/deformação.

A curva tensão/deformação é a premissa para obter informações importantes quanto ao comportamento do material, podendo ser extraídas propriedades vinculadas ao modelo do material como módulo de elasticidade, tensão de escoamento, ou coeficiente de Poisson³. É importante destacar que os denominados parâmetros de material não são estritamente vinculados a este, mas ao modelo que o representa.

Os principais ensaios destrutivos encontrados na literatura são os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e dureza. Já os não destrutivos são os ensaios de raio x, ultrassom, partículas magnéticas, correntes parasitas e visual. Neste trabalho serão abordados mais especificamente três ensaios destrutivos, quais sejam, os ensaios de tração, flexão e impacto, visto que estes serão utilizados para realizar a caracterização mecânica do material pretendido na fabricação do protótipo da telha de PET.

O ensaio de tração irá fornecer a curva de Tensão x Deformação e medir as propriedades de resistência à tração e ductilidade do compósito, bem como o módulo de elasticidade deste material. Já o ensaio de flexão servirá para determinar as propriedades de resistência à flexão, módulo de elasticidade, deformação sob flexão, que são propriedades importantes para o controle de qualidade e para avaliar o desempenho do compósito quando submetido à carga

³ Mede a deformação transversal na direção longitudinal onde a carga é aplicada.

de flexão. Por fim, o ensaio de impacto irá determinar a propriedade de resistência ao impacto e a tenacidade⁴ do compósito desenvolvido.

Através dos resultados destes ensaios será possível realizar uma análise de viabilidade técnica do compósito, verificando a possibilidade de sua aplicação na fabricação da telha.

2.5.1 Tração

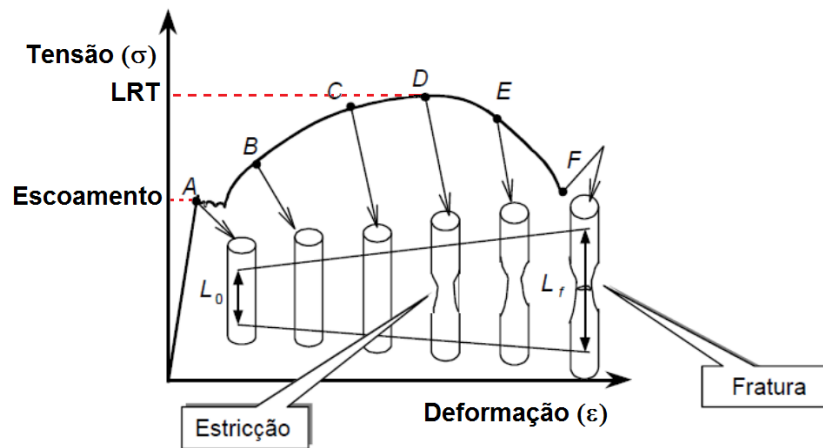
O ensaio de tração é tido como o ensaio destrutivo mais importante, devido à sua facilidade de execução e reprodução dos seus resultados. O ensaio consiste basicamente em aplicar uma força axial crescente num corpo sólido a fim de promover uma deformação (alongamento) correspondente do material na direção do esforço até a ruptura por intermédio de um extensômetro⁵. O ensaio é realizado em um corpo de prova (amostra do material) padronizado, permitindo que os resultados obtidos possam ser comparados e/ou reproduzidos (SOUZA, 1982; FREDEL; ORTEGA; BASTOS, 2015).

A resistência à tração é medida submetendo-se o material a uma carga ou força de tração, gradativamente crescente, que promove uma deformação progressiva do material em função da tensão aplicada. A Figura 11 ilustra a curva tensão-deformação de um material metálico genérico. O ponto F corresponde à fratura do material, enquanto o ponto D equivale ao limite de resistência à tração (LRT) – valor máximo de tração que o material resiste, pois a partir deste ponto ocorre a estricção do material, o que significa dizer que o material continua se deformando mesmo sem aumentar a carga, o que ocorre devido à redução de área.

⁴ É a quantidade de energia que um material pode absorver antes de romper-se.

⁵ Transdutor capaz de medir deformações mecânicas em corpos de prova com altíssima precisão. Consiste em um bipolo de resistência nominal que ao ser fixado no corpo de prova sofre a mesma deformação e então sua resistência é alterada. Essa variação de resistência é lida e processada para se obter a informação desejada.

Figura 11 - Comportamento típico da curva tensão-deformação até a fratura

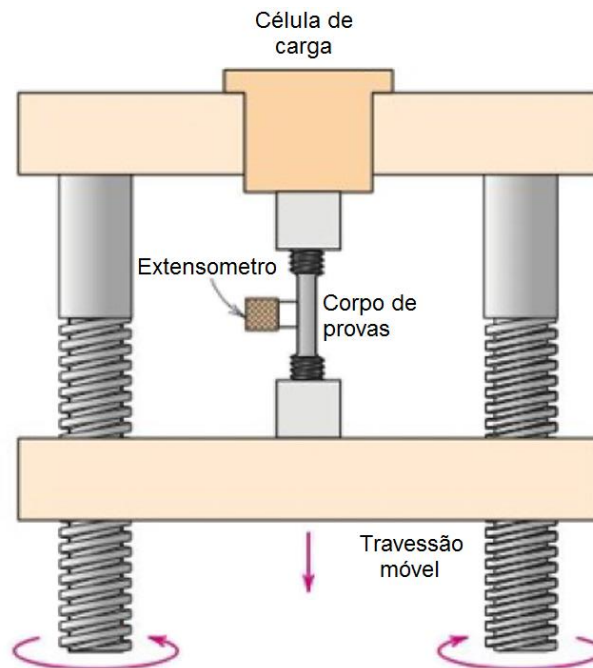


Fonte: adaptado de Neto (2006)

Já o ponto A é onde ocorre o escoamento, ou seja, é o ponto de tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico, e a partir deste ponto a deformação é irreversível (deformação plástica). Os cilindros representam o comportamento geométrico do material ao longo da curva tração-deformação até sua ruptura, bem como a variação de comprimento ($L_f - L_0$).

No ensaio de tração, o corpo de prova é preso pelas suas extremidades através de garras de fixação da máquina de ensaio de tração, que é devidamente projetada para providenciar o alongamento do corpo de prova em uma taxa constante, ao mesmo tempo em que mede a carga (tensão) que está sendo aplicada durante o ensaio. As tensões são obtidas através de uma célula de carga, enquanto os alongamentos são obtidos usando um extensômetro (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). A Figura 12, a seguir, traz uma representação esquemática do dispositivo para a condução de ensaios tensão-deformação sob tração.

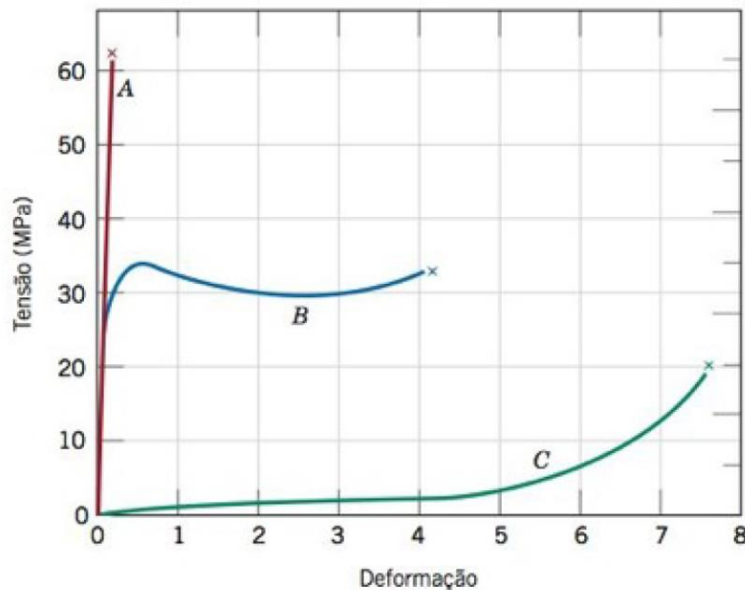
Figura 12 - Representação esquemática de um dispositivo usado para ensaio de Tração



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2013)

O comportamento tensão-deformação dos polímeros leva em consideração o módulo de elasticidade, limite de escoamento e limite de resistência à tração. A Figura 13 representa os três comportamentos tensão-deformação típicos encontrados para os materiais poliméricos. Os frágeis são considerados polímeros que sofrem fratura enquanto se deformam; já os plásticos apresentam deformação inicial elástica, seguido pelo escoamento e uma região de deformação plástica até a ruptura; por fim, os elastômeros, que por serem altamente elásticos podem sofrer grandes deformações reversíveis, desde que sejam realizadas sob baixos níveis de tensão (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Figura 13 - Comportamento Tensão-Deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e altamente elásticos (elastoméricos) (curva C).



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2013)

A determinação do módulo de elasticidade, bem como a ductilidade dos polímeros em termos da porcentagem do alongamento é determinada da mesma maneira que para os materiais metálicos, ou seja, está relacionado com a rigidez do material (resistência à deformação elástica) e é medido pela razão entre a tensão e a deformação relativa, dentro do limite elástico, em que a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

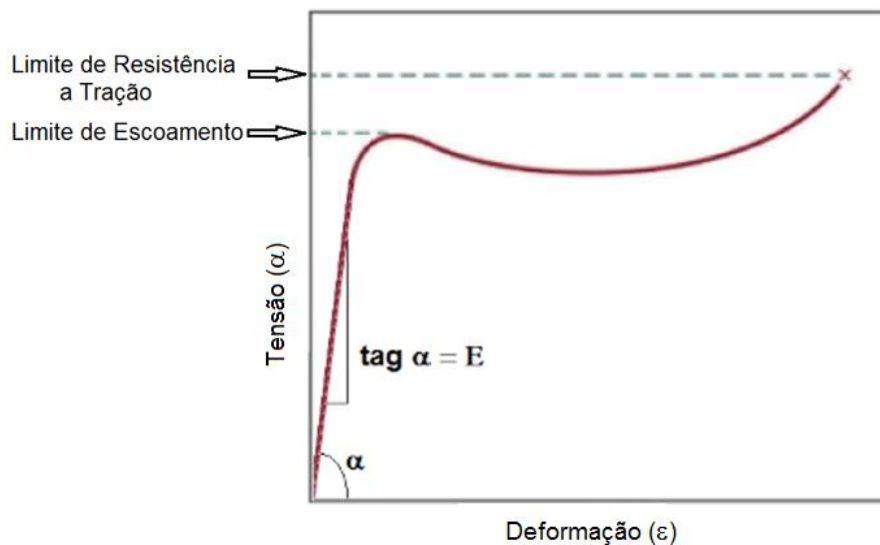
Tais características poderiam ser encontradas pela tangente da parte linear da curva caso os eixos fossem adaptados para tensão versus deformação, conforme mostra a Figura 14. A tensão pode ser obtida dividindo-se a força pela área transversal do corpo de prova, e a deformação relativa seria obtida dividindo-se a deformação absoluta (incremento no comprimento do corpo de prova) pelo comprimento útil do corpo de prova, como demonstrado pela equação a seguir:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta F/A}{\Delta x/L}$$

Nesta equação, temos que E = módulo de elasticidade; σ = tensão; ε = deformação; ΔF = força aplicada longitudinalmente ao corpo de prova; A = área

de secção transversal do corpo de prova; L = comprimento útil do corpo de prova;
 Δx = deformação absoluta.

Figura 14 - Curva tensão-deformação esquemática para um polímero plástico.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2013)

Para os polímeros plásticos, o limite de escoamento é tomado como o valor máximo na curva, que ocorre instantaneamente após a fase elástica linear, conforme mostra a Figura 14. Tecnicamente, até este ponto é possível aplicar a Lei de Hooke, conforme representado pela equação abaixo.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Sendo que em tal equação tem-se que ε = medida de deformação, (adimensional); σ = medida de tensão (MPa); E = Módulo de elasticidade (GPa).

Enquanto o limite de resistência tração corresponde ao ponto de tensão onde ocorre a fratura, podendo este ser maior ou menor que o limite de escoamento.

Em relação aos metais, os materiais poliméricos apresentam uma baixa resistência à fratura. Os polímeros termoplásticos podem apresentar tanto o modo de fratura frágil quanto o modo de fratura dúctil, e ainda, é possível que apresentem uma transição dúctil frágil. Os fatores que possibilitam a fratura frágil são redução de temperatura, aumento da taxa de deformação, presença de um entalhe afilado, maior espessura da amostra e qualquer modificação na estrutura do polímero que aumente a temperatura de transição vítrea⁶, ou seja, o polímero

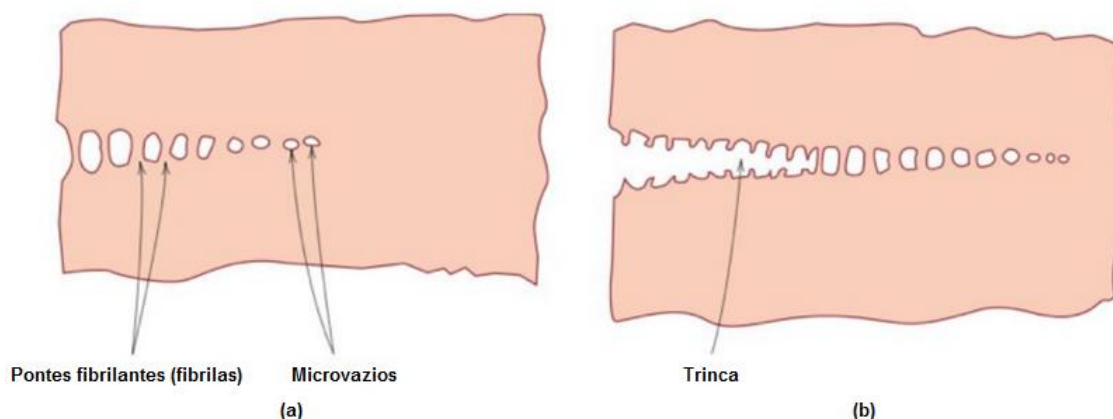
⁶ Temperatura que o polímero apresenta um comportamento viscoelástico

é um sólido com características de borracha, exibindo características mecânicas combinadas dos dois materiais (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Isto implica dizer que os polímeros termoplásticos vítreos, como o PET, por exemplo, apresentam um comportamento frágil até a temperatura de transição vítrea, sendo que no caso do PET esta temperatura gira em torno de 69°C. Contudo, à medida que a temperatura se eleva, estes polímeros se tornam dúcteis na vizinhança de suas temperaturas de transição vítrea e apresentam escoamento plástico antes da fratura.

Outro fenômeno que ocorre nos polímeros termoplásticos é a fibrilação. Para Callister e Rethwisch (2013), este fenômeno consiste basicamente na formação de microvazios interligados antes da ocorrência efetiva da trinca, aumentando significativamente a tenacidade à fratura do polímero. A Figura 15 a seguir representa a formação da trinca após ocorrer a fibrilação.

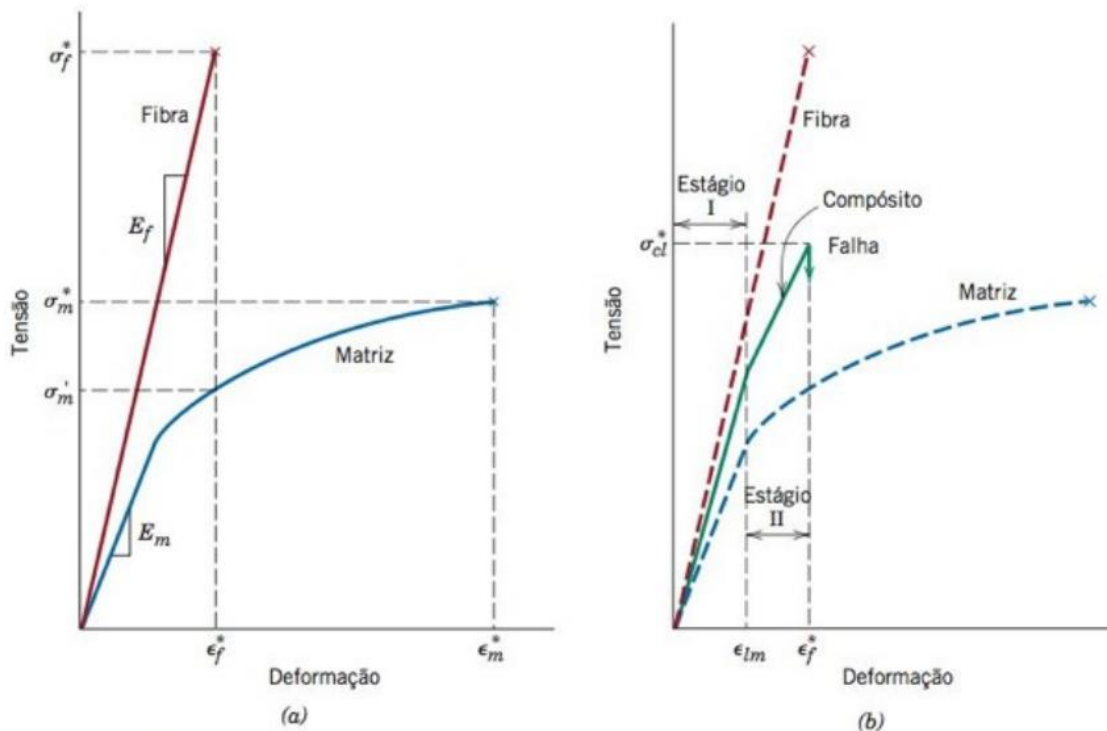
Figura 15 - Desenhos esquemáticos de (a) uma fibrilação em que são mostrados os micro vazios e (b) uma fibrilação seguida pela formação de uma trinca



Fonte: Callister e Rethwisch (2013)

Já os materiais compósitos combinam as propriedades da fibra com a matriz, possibilitando projetar materiais com combinações de propriedades melhores que as encontradas em qualquer liga metálica, cerâmica ou material polimérico. A Figura 16, a seguir, ilustra o comportamento, de forma esquemática, de um compósito representado pela curva de tensão-deformação, que demonstra bem o desempenho dos compósitos em relação às combinações de propriedades mecânicas (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

Figura 16 - Curva tensão-deformação esquemática de compósito



Fonte: Callister e Rethwisch (2013)

Na Figura 16(a) está representada a curva tensão-deformação esquemática para uma fibra frágil e matriz dúctil, de modo que as tensões e deformações na fratura para ambos os materiais estão assinaladas. Enquanto a Figura 16(b) representa a curva tensão-deformação esquemática para um compósito reforçado com fibras alinhadas, exposto a uma tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento, estando as curvas da fibra e da matriz incluídas para dar perspectiva. É perceptível que o compósito apresenta uma característica intermediária entre a matriz e a fibra utilizadas.

A Tabela 1, a seguir, representa os valores típicos para os limites de escoamento, os limites de resistência à tração, ductilidade em alongamento percentual e módulo de elasticidade à temperatura ambiente para alguns materiais citados neste trabalho.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais

<i>Material</i>	<i>Limite de Escoamento (Mpa [Ksi])</i>	<i>Limite de Resistência a Tração (Mpa [Ksi])</i>	<i>Alongamento Percentual</i>
$\text{Aço } \circ$ Aço 1020 Laminado a quente	210 (30) (mín)	380 (55) (mín)	25 (mín)

	Aço 1020 Laminado a frio	350 (51) (mín)	420 (61) (mín)	15 (mín)	
	Cloreto de Polivinila (PVC)	40,7-44,8 (5,9-6,5)	40,7-51,7 (5,9-7,5)	40-80	
	Elastomero - Silicone	-	10,3 (1,5)	100-800	
	Epóxi	-	27,6-90,0 (4,0-13)	3-6	
	Naylon 6,6 seco	55,1-82,8 (8-12)	94,5 (13,7)	15-80	
Polímeros	Poli(etileno tereftalato) (PET)	59,3 (8,6)	48,3-72,4 (7,0-10,5)	30-300	
	Policarbonato (PC)	62,1 (9)	62,8-72,4 (9,1-10,5)	110-150	
	Poliestireno (PS)	25,0-69,0 (3,63-10,0)	35,9-51,7 (5,2-7,5)	1,2-2,5	
	Polietileno alta densidade PEAD)	26,2-33,1 (3,8-4,8)	22,1--31,0 (3,2-4,5)	10-1200	
	Polietileno baixa densidade PEBD)	9,0-14,5 (1,3-2,1)	8,3-31,4 (1,2-4,55)	100-650	
	Polietileno ultra-alta massa molar (UHMWPE)	21,4-27,6 (3,1-4,0)	38,6-48,3 (5,6-7,0)	350-525	
	Polipropileno (PP)	31,0-37,2 (4,5-5,4)	31,0-41,4 (4,5-6,0)	100-600	
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	13,8-15,2 (2,0-2,2)	20,7-34,5 (3,0-5,0)	200-400	
	Materiais Fibrosos	Aramida (Kevlar 49)	-	3600-4100 (525-600)	2,8
		Carbono (precursores PAN), Módulo-padrão (longitudinal)	-	3800-4200 (550-610)	2
Vidro E		-	3450 (500)	4,3	
Materiais Compósitos	Fibras aramidadas-matriz epóxi (alinhadas, Vf=0,6) - longitudinal	-	1380 (200)	1,8	
	Fibras aramidadas-matriz epóxi (alinhadas, Vf=0,6) - transversal	-	30 (4,3)	0,5	
	Fibras de carbono de módulo alto-matriz epóxi (alinhadas, Vf=0,6) - longitudinal	-	760 (110)	0,3	
	Fibras de carbono de módulo alto-matriz epóxi (alinhadas, Vf=0,6) - transversal	-	28 (4)	0,4	
	Fibras de vidro E-matriz epóxi (alinhadas, Vf=0,6) - longitudinal	-	1020 (150)	2,3	
	Fibras de vidro E-matriz epóxi (alinhadas, Vf=0,6) - transversal	-	40 (5,8)	0,4	

* Valor não informado

Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2013)

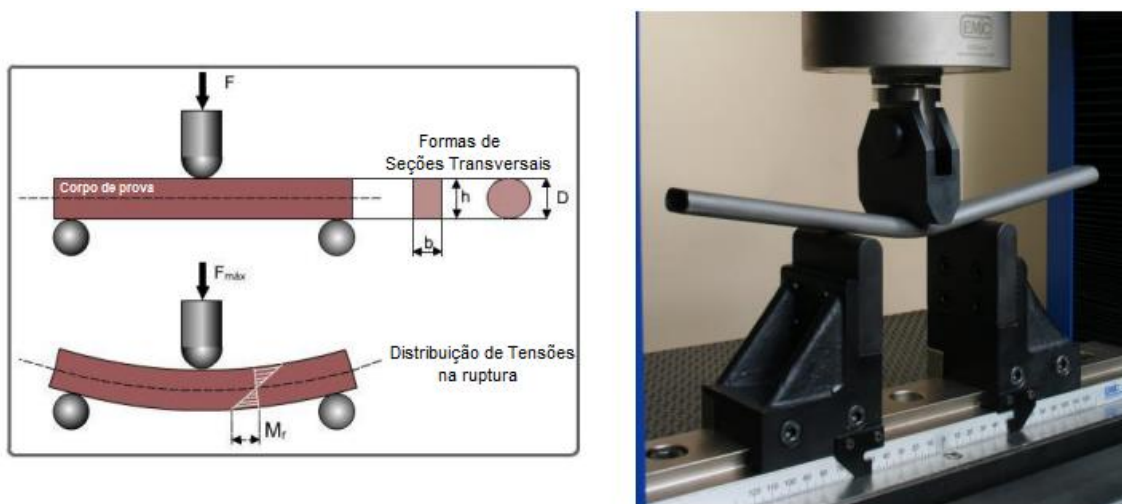
2.5.2 Flexão

Para Souza (1982), o ensaio de flexão geralmente é realizado com a intenção de reproduzir, no laboratório, as condições da prática. É possível criar diversas maneiras de realizar esse ensaio, desde que a peça possa ser adaptada diretamente em uma máquina comum. Este ensaio é muito utilizado em juntas metálicas soldadas, aplicando-se a carga próximo à junção, tornando possível a verificação do esforço de flexão suportado pelo corpo de prova sem se romper.

Já os materiais frágeis são frequentemente submetidos ao ensaio para medir sua resistência, sua ductilidade e avaliação da sua tenacidade e resiliência.

O ensaio consiste basicamente em submeter um corpo de prova com geometria preferencialmente circular ou retangular a uma carga de dobramento ou flexão aplicada no centro do corpo de prova, que fica apoiado sobre dois apoios com uma distância L entre si, conforme a Figura 17 (ensaio de três pontos). A carga do ensaio é aumentada até que se rompa o material, ou até que ele atinja um ângulo de dobramento, no caso de materiais com maior ductilidade (FREDEL; ORTEGA; BASTOS, 2015).

Figura 17 - Ensaio de dobramento estendido para ensaio de flexão



Fonte: Fredel, Ortega e Bastos (2015)

Durante o ensaio, a face superior é comprimida, enquanto a face inferior é tracionada. Por este motivo, a tensão de flexão é obtida na superfície oposta ao carregamento, ou seja, na superfície inferior. O resultado do ensaio avalia a tração na face inferior do material à medida que é submetido a um carregamento de flexão a uma velocidade contínua. Após o ensaio, registra-se o valor da força máxima e se calculam as tensões axial e cisalhante, bem como as demais propriedades.

As principais propriedades obtidas no ensaio de flexão são o módulo de ruptura na flexão, o módulo de elasticidade, o módulo de resiliência e o módulo de tenacidade. Este ensaio é amplamente utilizado em materiais cerâmicos, polímeros e metais duros, pois fornece dados de deformação quando sujeitos a cargas de flexão.

A ISO 178 (2015) considera que a tensão de flexão axial é obtida através da equação a seguir:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Na qual σ_f = tensão de flexão (MPa); F = força (N); L = distância entre os apoios (mm); b = largura do corpo de prova (mm); h = espessura do corpo de prova (mm).

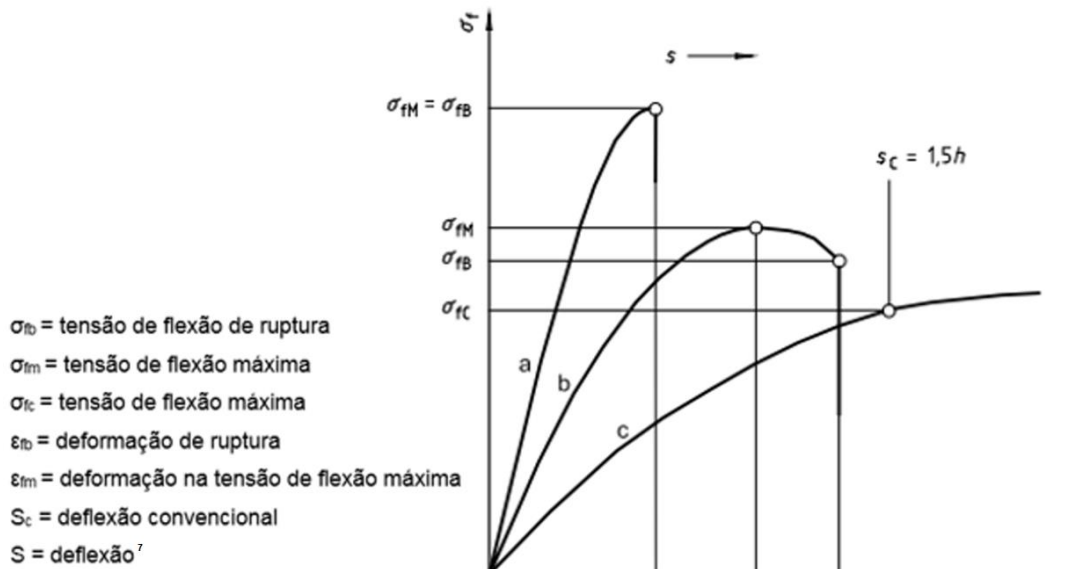
Por outro lado, a tensão cisalhante é obtida através da equação:

$$\tau = \frac{v \cdot Q}{I \cdot b}$$

Sendo que τ = tensão cisalhante (MPa); v = força cortante máxima (N); Q = momento estático (m³); I = momento polar de inércia (m⁴); b = largura da seção.

Tipicamente, são encontrados três tipos diferentes de comportamento tensão-deformação para os materiais poliméricos, como representado na Figura 18. A “curva a” ilustra o comportamento tensão-deformação para um polímero frágil, mostrando que ele fratura enquanto se deforma elasticamente. Já o comportamento para um material plástico “curva b” se assemelha aos materiais metálicos, nos quais a deformação inicial é elástica, seguida por escoamento e uma região de deformação plástica. Por fim, a deformação identificada pela “curva c”, a qual é totalmente elástica, demonstrando um típico modelo de um elastômero (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

Figura 18 - Comportamento tensão-deformação para polímeros frágeis (curva a), plásticos (curva b) e altamente elásticos (curva c)



Fonte: ISO 178 (2015)

Um exemplo prático do uso do ensaio de flexão foi aplicado por Holguín (2015), tendo sido aplicado na caracterização de materiais poliméricos com o intuito de verificar se as intempéries de temperatura causadas pelos processos de reciclagem do PET e do PP influenciariam nas suas resistências à flexão. A Tabela 2 demonstra os resultados de resistência à flexão encontrados para o PET e o PP reciclados em comparação com os polímeros puros.

Tabela 2 - Resultados de resistência a flexão do PET e PP

<i>Material</i>	<i>Resistência a Flexão (MPa)</i>	<i>Módulo de Tensão (MPa)</i>
PP puro	33 ± 0,0	1600 ± 0,0
PP reciclado	32 ± 0,4	1571 ± 12,8
PET reciclado	84 ± 0,6	2896 ± 74,1
PET puro	95 ± 0,0	3700 ± 0,0

Fonte: Adaptado de HOLGUÍN (2015)

2.5.3 Impacto

Apesar dos ensaios de tração apresentarem uma ótima avaliação do comportamento dos materiais através da curva tensão-deformação, com limites de resistência à tração e ruptura bem definidos, o material pode vir a fraturar sob

⁷ De acordo com a norma ISO 178 (2015) a deflexão convencional para materiais polímeros é igual a 1,5 vezes a espessura do corpo de prova

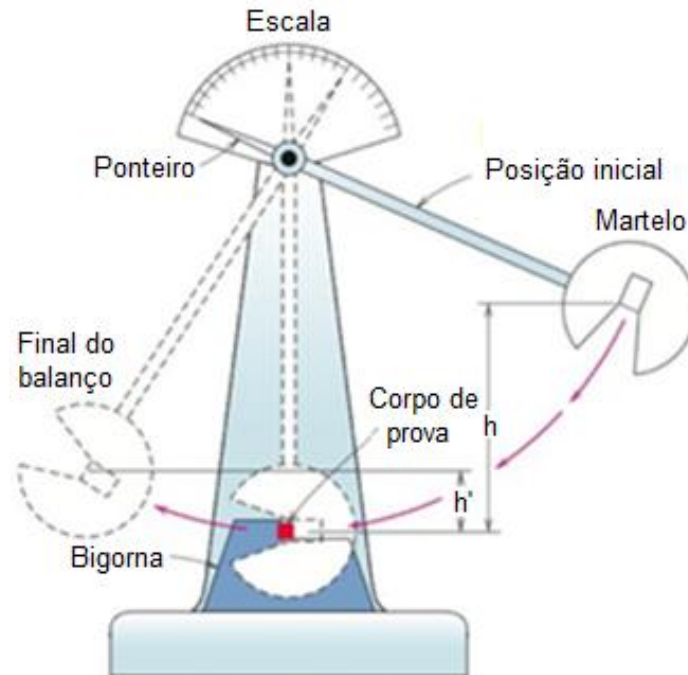
tensões mais baixas do que as apresentadas no gráfico. Este fenômeno acontece devido à fragilização do material por consequência de alguns fatores, tais como a taxa de deformação elevada; concentrações de tensão; trincas ou temperatura baixa, que alteram o comportamento dúctil/frágil do material (FREDEL; ORTEGA; BASTOS, 2015).

Diante dos fatos, ensaios mais severos, como por exemplo o ensaio de impacto, foram desenvolvidos para analisar o comportamento dúctil/frágil dos materiais. Este ensaio visa a análise do comportamento dos materiais, pondo em teste a probabilidade de se comportar de uma maneira frágil. Através dele, é possível avaliar tanto a tenacidade⁸ quanto a temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) do material, através do gráfico de energia absorvida x temperatura obtido (FREDEL; ORTEGA; BASTOS, 2015).

O ensaio é dinâmico e consiste na aplicação instantânea de uma carga no corpo de prova através de um martelo pendular balanceado, que é liberado de uma posição predeterminada, a uma altura fixa, com energia necessária para ocorrer a fratura. A Figura 19 ilustra o ensaio, onde o corpo de prova permanece posicionado na base, e após a liberação do pêndulo, sua aresta afilada atinge e fratura o corpo de prova no entalhe que atua como um ponto de concentração de tensões para esse impacto à alta velocidade. Após o impacto, o pêndulo continua seu trajeto até atingir uma altura máxima (h'), e a diferença entre h e h' resulta na energia absorvida (CALLISTER; RETHWISCH).

⁸ Resistência que um material possui ao choque ou pancada sem se romper

Figura 19 - Esquema do ensaio de impacto



Fonte: Callister e Rethwisch (2013)

A intenção é que, com o impacto gerado no corpo de prova, este rompa. Contudo, o pêndulo continua seu movimento até cessar a energia. A diferença entre a energia inicial e a final corresponderá à energia absorvida pelo material. Por meio da escala, que indica a posição do pêndulo, é possível calcular a energia potencial através da seguinte equação:

$$E_p = m \cdot g \cdot \Delta h$$

Pela qual E_p = energia potencial (J/m); m = massa (g); g = gravidade (m/s^2); h = variação de altura ($h_f - h_i$).

Embora não existam normas para todos os tipos de ensaios de impacto e para todos os materiais, já existem algumas normas e recomendações publicadas para impacto. Em nível tecnológico, o ensaio mais utilizado para medir a resistência ao impacto de materiais poliméricos é o tipo *Charpy* e *Izod*, os quais estão especificados, respectivamente, pelas normas ASTM D6110 e ASTM D256. A Tabela 3, a seguir, compara os valores da tenacidade à fratura em deformação plana e da resistência à temperatura ambiente de um aço 1040 com alguns materiais poliméricos.

Tabela 3 - Valores da tenacidade à fratura em deformação plana e da resistência à temperatura ambiente

	<i>Material</i>	<i>Tenacidade à Fratura</i>		<i>Resistência* (Mpa)</i>
		<i>MPa/m</i>	<i>Ksi/in</i>	
Aço	Aço 1040	54	49	260
	Aço 4340 revenido a 260°C	55-65	50-59	1375-1585
Polímeros	Cloreto de Polivinila (PVC)	2,0-4,0	1,8-3,6	40,7-44,8
	Epóxi	0,6	0,55	-
	Naylon 6,6	2,5-3,0	2,3-2,7	44,8-58,6
	Poli(etileno tereftalato) (PET)	5,0	4,6	59,3
	Policarbonato (PC)	2,2	2,0	62,1
	Poliestireno (PS)	0,7-1,1	0,6-1,0	-
	Polipropileno (PP)	3,0-4,5	2,7-4,1	31,0-37,2

*A resistência é tomada como o limite de escoamento

Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2013)

Para Atta (2014), as principais diferenças entre os dois métodos de ensaio são a posição da amostra; a direção do entalhe; o tipo de entalhe; as dimensões da amostra e o tipo de martelo. A Tabela 4 ilustra melhor estas diferenças.

Tabela 4 - Diferenças entre os ensaios de impacto Charpy e Izod

	<i>CHARPY</i>	<i>IZOD</i>
Posição da amostra	Horizontal	Vertical
Direção do entalhe	Posição oposta ao martelo	Na direção do martelo
Tipo de entalhe	Em V ou U	Somente em V
Tipo de martelo	"Farming"	"Ball Pin"

Fonte: Adaptado de MACIEL (2017)

Para Silva (2004), as normas para teste de impacto em materiais compósitos utilizam técnicas de ensaio, nas quais se utiliza pêndulo como Charpy e Izod apenas para uma estimativa da resistência ao impacto. Estes métodos, porém, são amplamente empregados para se comparar o comportamento ao impacto destes materiais, haja vista a grande variedade de compósitos projetados nas últimas décadas.

Boczar, Andrade e Fernandes (2012), por exemplo, estudaram a resistência mecânica de um compósito laminado, de matriz epóxida, reforçado por tecido de fibras híbridas de aramida-vidro. Neste caso, a maior resistência ao impacto encontrada foi de 232,44KJ/m² para corpos de prova com 10mm de espessura, bem como módulo de elasticidade de 4,14GPa e uma tensão de

ruptura média de 203,44MPa, ou seja, valores da mesma ordem de grandeza da tensão de escoamento de alguns aços.

Compósitos anisotrópicos aumentam sua resistência ao impacto à medida em que sua espessura aumenta, ou seja, quanto maior a quantidade de camadas, maior será a quantidade de fases do compósito, resultando em maior resistência ao impacto. Isso não ocorre nos materiais metálicos, por exemplo, porque são isotrópicos. Neste caso, a resistência ao impacto é independente da espessura, uma vez que o material é homogêneo. Para estes casos, a resistência ao impacto é calculada pela razão entre a energia absorvida por unidade de área da secção transversal (BOCZAR, ANDRADE e FERNANDES, 2012).

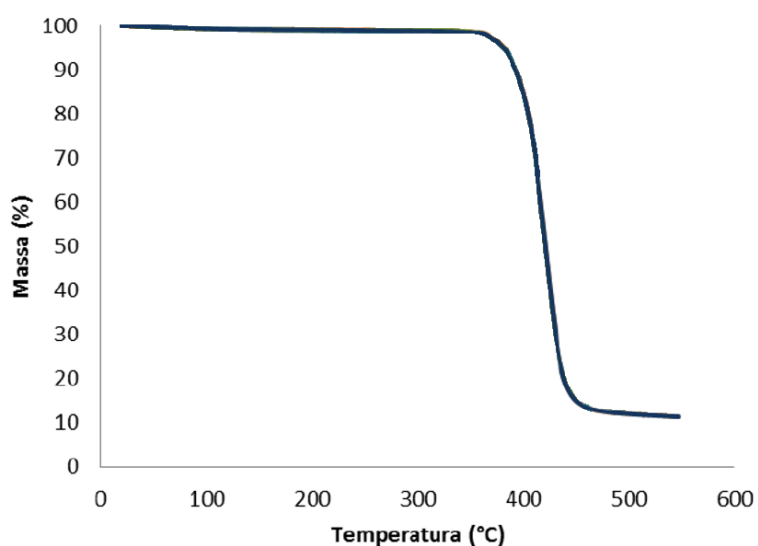
2.6 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica, ou TGA, como é mais comumente chamada, consiste numa técnica termo analítica⁹ capaz de analisar a estabilidade e degradação térmica de um material. O resultado é expresso através de uma curva característica, na qual as alterações na massa da amostra (perda ou ganho) são determinadas em função da temperatura e/ou tempo. A derivada desta curva, a DTGA, fornece informações sobre a natureza e a extensão da degradação do material (HOLGUÍN, 2015).

A Figura 20 expressa a curva TGA característica de amostras de PET reciclado. Segundo Holguín (2015), o PET reciclado só começa a perder massa a partir de 350°C até 510°C. Neste intervalo, ocorre uma perda de 89% da massa inicial das amostras. Isso significa que até a temperatura de 350°C, o material da amostra é termicamente estável, apresentando baixíssima degradação em função de intempéries.

⁹ Conjunto de técnicas nas quais uma propriedade física é medida enquanto a amostra é submetida a um programa controlado de temperatura.

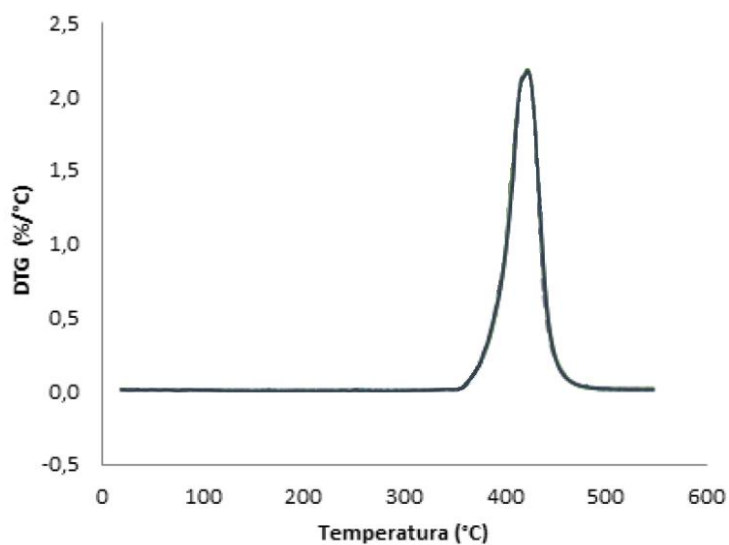
Figura 20 - Curvas TGA das amostras de PET reciclado exposto aos diferentes ambientes



Fonte: Adaptado de HOLGUIN (2015)

Alguns softwares já fornecem a curva característica de DTGA, que basicamente fornece a temperatura de pico de degradação térmica da amostra. Isso permite identificar qual a natureza do material. A Figura 21 expressa o gráfico DTGA da curva encontrada na curva TGA da Figura 20. Por meio de sua análise, percebe-se que a temperatura de pico está próxima à temperatura de 400°C. Este pico é característico de cada material, trata-se de sua identidade térmica ou história térmica.

Figura 21 - Curvas DTG das amostras de PET reciclado exposto aos diferentes ambientes.



Fonte: Adaptado de HOLGUIN (2015)

2.7 Aplicações para PET Reciclado – Estudos de Caso

A transformação do PET reciclado pode acontecer de maneiras diferentes, conforme o produto final que irá ser fabricado com a matéria-prima reciclada. Vários setores da economia utilizam produtos que levam PET reciclado.

A tecnologia “bottle-to-bottle” reutiliza PET reciclado para reprocessar novas embalagens para alimentos, prática que é permitida na Europa e Estados Unidos. O reprocessamento mecânico tem etapas variáveis para o processo, a depender do tipo de polímero. Geralmente ocorre a etapa de separação, seguida de moagem, lavagem e a etapa de secagem. O processo químico de reciclagem envolve a transformação química do polímero. O polímero diminui o seu peso molecular por meio de despolimerização, ou mesmo por diminuição do comprimento da cadeia (ruptura) (EHRIG; CURRY, 1992).

Nesta toada, foram selecionados alguns trabalhos desenvolvidos nos últimos anos, referentes ao desenvolvimento de materiais e produtos derivados da reciclagem de resíduos sólidos relevantes para o desenvolvimento desta dissertação. Destes trabalhos, alguns apresentaram a utilização do reprocessamento mecânico, enquanto outros se valeram do processamento químico. Iniciar-se-á com trabalhos específicos que abordam o estudo de viabilidade técnica e/ou econômica de telhas que foram desenvolvidas utilizando compósitos com PET reciclado e de telhas que utilizam outros materiais reciclados. Em seguida, relatar-se-á estudos relacionados ao desenvolvimento de outros produtos e materiais derivados do PET reciclado, sempre seguindo uma ordem cronológica crescente.

2.7.1 Telhas de materiais reciclados

Placas e telhas de material reciclado derivado de embalagens longa vida, constituída por 75% de papel, 20% de polietileno e 5% de alumínio são uma alternativa na indústria moveleira e civil, em substituição às telhas de fibrocimento. Empresas fabricantes de placas e telhas, como a Ecoways, a Ibpaplac e a Reciplac, localizadas em São Paulo, já vêm utilizando matéria prima secundária (derivada de produtos reciclados) na obtenção dos seus produtos. A fabricação consiste, basicamente, na fusão do material reciclado sob pressão,

seguida de um resfriamento, sendo o material previamente processado e reduzido até chegar à fase apropriada para se fundir (DE CERQUEIRA, 2003).

Ferreira (2001) realizou testes de impermeabilidade, conforme NBR 5642, nas telhas fabricadas a partir da reciclagem de embalagens longa vida. Foi constatado que não ocorreu a formação de manchas de umidade, nem a formação de gotas nas superfícies dos corpos de prova, concluindo-se que os materiais empregados na fabricação das telhas possuem alta impermeabilidade.

De Cerqueira (2003) realizou ensaios mecânicos de resistência à tração e à flexão em materiais similares, derivados do mesmo processo de reciclagem analisados por Ferreira (2001), e comparou com os resultados de fibrocimento, além de verificar a absorção de água e determinação do índice de propagação de chama, utilizando o método do Painel Radiante, de acordo com a NBR 9442/1986, nos dois materiais.

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos não destoaram de um material para o outro, sendo que as propriedades obtidas nas telhas produzidas de embalagens de longa vida foram superiores, apresentando alta resistência à flexão e baixa absorção de água. Já em relação ao índice de propagação de chama, o material derivado das embalagens apresentou desempenho considerado mediano (FERREIRA, 2001).

Portanto, provou-se que a utilização de materiais reciclados para obtenção de telhas e placas é uma alternativa viável, que apresenta benefícios estruturais e técnicos, além de benefícios econômicos, sociais e ambientais, já que o uso destes materiais reciclados promove a coleta seletiva e o processamento dos materiais, tornando o produto final mais sustentável.

Em 2010, foi realizada a avaliação de polímeros termoplásticos recicláveis como matéria-prima na fabricação de telhas e tijolos, em substituição a materiais convencionais como concreto, madeira, cerâmica e cimento-amianto. O polietileno de alta densidade (PEAD) e o Polipropileno (PP) foram selecionados para confecção dos corpos de prova. Tanto o processo de fusão dos polímeros quanto os ensaios de compressão foram realizadas de acordo com a norma NBR 9628 (MORAES *et al*, 2010).

Segundo Moraes *et al* (2010), os resultados encontrados indicaram que para os tijolos, os polímeros estudados apresentaram maior resistência à compressão. Além disso, os polímeros apresentaram facilidade em ser

modelados, contudo, para se obter resultados ainda melhores, seria necessário realizar os trabalhos em ambientes devidamente controlados e, quando trabalhados em larga escala, deverá utilizar-se o método de extrusão.

No mesmo ano, um estudo de viabilidade econômica realizado por Silva, Franciscon e Da Rocha (2010) relacionou as vantagens econômicas e ecológicas de se utilizar telhas de PET em relação às telhas de material cerâmico convencional. A comparação se limitou em analisar as características físicas e químicas de cada produto e a viabilidade econômica aplicada à construção do telhado de uma moradia popular oferecida pela Secretaria Municipal de Planejamento de Goiânia (SEPLAN).

O modelamento utilizado permitiu calcular o orçamento, o rendimento e o consumo de material para cada tipo de telha. O resultado apresentado indicou que as telhas fabricadas de PET possuem um custo, por metro quadrado, de 7,5 vezes maior que as telhas fabricadas de cerâmica, porém, o peso, por metro quadrado, é 6,7 vezes menor (SILVA; FRANCISCON; DA ROCHA; 2010).

Para Silva, Franciscon e Da Rocha (2010), se forem consideradas apenas as questões econômicas para aplicação das telhas, ou seja, apenas o custo por metro quadrado, a telha de cerâmica é economicamente mais viável que a telha de PET. O custo da matéria-prima e a dificuldade de produção da telha PET foram apontadas como fatores determinantes para elevação do custo de fabricação, influenciando diretamente no fator econômico.

No entanto, o fator econômico é compensado no custo estrutural, ou seja, a estrutura que irá suportar a aplicação das telhas de PET é economicamente mais viável que a estrutura para suportar as telhas de cerâmica, justamente pela relação de peso por metro quadrado das telhas de cerâmica ser significativamente maior (SILVA; FRANCISCON; DA ROCHA, 2010).

Almeida (2013) realizou um trabalho que apontou as principais vantagens da utilização de telhas de PET em relação às telhas de cerâmica convencionais. Dentre elas, pode-se enumerar o baixo custo; a eficiência; a excelente propriedade de fluxo luminoso; o brilho e transparência; resistência às temperaturas mais altas (cerca de 85°C) e não apresentação de porosidades, evitando o acúmulo de umidade e mofo. Tudo isso proporciona uma melhor

relação custo-benefício das telhas de PET em relação às telhas de cerâmica convencionais.

A fabricação das telhas de PET ocorreu através do processo de injeção de uma mistura de resinas poliméricas, obtida através da reciclagem de garrafas plásticas e o Carbonato de Cálcio. Através deste processo, as telhas de PET custam cerca de R\$ 35,00 o m²; já as telhas de cerâmica custam cerca de R\$ 15,00 o m². Enquanto o custo da estrutura de sustentação das telhas de PET variou próximo a R\$ 15,00 o m², o custo da estrutura para receber as telhas de cerâmica variou próximo a R\$ 75,00 o m². Portanto, considerando as telhas e conjunto estrutural, as telhas de cerâmica custam cerca de 50% a mais em relação às telhas de PET (ALMEIDA, 2013).

Já em 2015, foi desenvolvido um produto por Teske, Gonçalves e Nagalli, (2015), denominado de telha GEPET, constituída por uma capa polimérica de PET reciclado envolvendo resíduo de gesso derivado da construção civil. A produção das telhas constitui-se a partir da moagem do PET, tendo os resíduos moídos sido misturados numa fração de 50% com grânulos de PET virgem; em seguida, passaram por um processo de secagem por um período de 10 horas. Como a homogeneização é difícil em virtude das diferentes massas específicas, um processo de extrusão foi realizado, sendo realizado, em seguida, um novo picotamento para obter grãos mais densos.

Foi adicionado, aos resíduos, um aditivo que protege contra a ação dos raios UV, a fim de se evitar a degradação por radiação solar. Em seguida, foi feita a injeção do PET no molde próprio de telha colonial gigante com uma espessura de paredes de 2mm e um vazio interno de 11mm, destinado à inserção de resíduos de gesso. Posteriormente, o pó de gesso foi despejado no vazio 11mm, sendo a telha selada termicamente por fusão e, por fim, foram removidas as rebarbas (TESKE; GONÇALVES; NAGALLI, 2015).

Segundo Teske, Gonçalves e Nagalli (2015), o produto GEPET apresentou maior conforto térmico, maior durabilidade, menor massa equivalente e manutenção facilitada em relação às telhas de cerâmica convencionalmente utilizadas. Contudo, sugeriram estudos para viabilizar sua comercialização, uma vez que o custo é muito superior aos custos das telhas de PET atualmente comercializadas.

2.7.2 Outros produtos de PET reciclado

Um estudo realizado em 2012, a partir de uma visão sustentável, desenvolveu uma argamassa utilizando resíduos plásticos obtidos do PET como agregado, nas concentrações de 5, 10, 15 e 20%, em substituição aos agregados naturais (areia). Os resultados encontrados mostraram-se viáveis quanto à utilização de resíduos de PET como substitutos parciais agregados a materiais compósitos, mesmo apresentando redução na resistência à flexão e à compressão, o que torna o material mais dúctil e menos frágil. Por outro lado, houve uma melhora significativa no módulo de flexão e da elasticidade. Também foi observado que a resistência à flexão e à compressão é aumentada na medida em que ocorre aumento do conteúdo de material PET no compósito (REIS; CARNEIRO, 2012).

Na mesma perspectiva, DA SILVA, em 2014, desenvolveu uma argamassa utilizando resíduos plásticos obtidos do PET como agregado nas concentrações de 5, 10 e 15%, em substituição aos agregados naturais. Após as caracterizações e os ensaios mecânicos realizados, os resultados encontrados mostraram que a argamassa com agregado de PET apresentou queda de resistência à compressão e flexão, tornando-a mais dúctil. Do mesmo modo, as propriedades de adesividade e absorção de água foram reduzidas devido a variações de porosidade, contudo, houve melhora na permeabilidade ao vapor de água, resistência ao impacto e estabilidade dimensional, o que proporciona redução de rachaduras, tornando viável a utilização dos resíduos de PET como agregados em argamassas, em substituição aos agregados naturais (DA SILVA; DE BRITO; VEIGA, 2014).

Em 2016 foi desenvolvido, na Universidade Federal de São Paulo, um estudo que avaliou as propriedades mecânicas e a flamabilidade de concretos poliméricos produzidos com resina PET e retardante de chamas, todos reciclados. O intuito da pesquisa foi avaliar a resistência mecânica e a flamabilidade de um concreto polimérico desenvolvido a partir de resina de PET contendo alumina residual, proveniente do processo de polimento industrial, que atua como retardante de chamas, areia de rio como agregado e cinza volante como fíler (GORNINSKI; TONET, 2016).

Foram confeccionados vários corpos de prova seguindo as normas regulamentares, variando as proporções de retardante comercial (alumina trihidratada). Do mesmo modo, foram confeccionados corpos de prova variando as proporções de alumina residual proveniente do processo de polimento industrial e comparados aos dois padrões de amostras e suas respectivas variações quanto ao percentual de alumina comercial e residual (GORNINSKI; TONET, 2016).

Ensaio de tração, compressão e flexão foram realizados seguindo normas previamente estabelecidas. Do mesmo modo, testes de combustibilidade foram realizados nas amostras. Nos testes, as amostras contendo os dois tipos de retardante de chamas, seja comercial ou de polimento, apresentaram resultados similares, ou seja, ambos os compósitos contendo retardante de chamas apresentaram uma resistência à tração próxima a 30MPa, bem acima da apresentada pela literatura, que é de 20MPa. Além disso, as propriedades de resistência à inflamabilidade foram significativamente melhoradas, o que viabiliza a utilização deste concreto polímero para aplicações na construção civil (GORNINSKI; TONET, 2016).

No ano seguinte, um trabalho desenvolvido por Zancanella *et al* (2017) realizou testes de tração seguindo o padrão ASTM D 638 (2014) em amostras de um composto de PET e fibra de vidro com resina de poliéster. As amostras foram constituídas por uma camada de fibra de vidro com resina poliéster e catalisador, revestidas com mantas de PET trançadas em tiras de, aproximadamente, 5mm de largura, ligadas através de resina e catalisador; em seguida, foi aplicada outra camada de resina, manta de vidro e finalizado com uma última camada de resina, sendo as amostras, por fim, prensadas.

Os testes foram realizados em uma máquina universal de testes da marca TIME GROUP com velocidade de 5mm/min e strain gauge de 50mm, com precisão de 0,001mm, obtendo-se uma média de 30,5MPa de resistência à tração, indicando que o compósito obtido apresentou comportamento frágil e limite de resistência à tração inferior à do PET puro, que fica entre 48,3 e 72,4MPa, conforme apresentou Callister (2006). Concluíram, portanto, que o material poderia ser utilizado em construção em geral que não tenha o requisito de alta resistência mecânica (ZANCANELLA *et al*, 2017).

No mesmo ano, Gandara (2017) estudou a obtenção de um compósito derivado do processamento termomecânico a partir da fibra da cana-de-açúcar tratada por explosão a vapor, utilizando matriz polimérica de polietileno tereftalato. O PET foi devidamente lavado e seco; depois, fragmentado em um moinho de facas. As fibras de cana-de-açúcar *in natura* foram lavadas, secas e o bagaço moído no moinho de facas. Já as fibras tratadas foram submetidas ao processo de explosão a vapor em um reator aquecido a 180°C por 15 minutos, seguida por uma descompressão brusca, ocasionando a explosão, sendo removidos, posteriormente, os componentes hidrolisados.

Peneiras com malhas de 20 e 30mesh foram utilizadas para realizar a uniformização e separação de agregados das fibras. Após o peneiramento, tanto as fibras quanto o PET foram secados em estufa por meio de circulação forçada de ar a uma temperatura de 120°C por 12 horas e, em seguida, foi realizada uma pré-mistura da fibra com o PET em proporções variadas e adicionado estabilizante térmico Songnox 21B na concentração de 0,15% (GANDARA, 2017).

O material obtido após a pré-mistura foi levado para processamento termomecânico em uma extrusora monorroscas, sendo que tanto o PET virgem como o PET reciclado e os compósitos foram processados. Parte dos materiais obtidos foram utilizados na preparação de corpos de prova, que, posteriormente, foram submetidos a ensaios de tração a uma velocidade de 5mm/min, utilizando a norma ASTM D638-10 com carga de célula de 5KN, compressão e resistência ao impacto charpy com pêndulo para escala de testes de 4J. A outra parte foi encaminhada para análises e caracterização (GANDARA, 2017).

Já as análises de microscopia de varredura foram realizadas em um microscópio LEO 1450 VP com tensão de 20Kv, tendo as amostras sido fraturadas em nitrogênio líquido e metalizadas com ouro antes das análises em alto vácuo, enquanto as análises termogravimétricas (TGA) foram feitas em amostras com massa próxima a 14mg, na faixa de temperatura de 20 a 900°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min sob uma atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100mL/min. As análises de infravermelho por transformada de Fourier foram feitas utilizando pastilhas de KBr e os espectros obtidos com resolução de 4cm⁻¹ em 64 varreduras (GANDARA, 2017).

Segundo Gandara (2017), fibras de cana-de açúcar pós tratamento sofreram modificações na estrutura física, apresentando aumento na área superficial das fibras, sendo que não houve alterações significativas das propriedades dos compósitos PET/fibra tratada em relação aos compósitos PET/fibra *in natura*, devido à não penetração da matriz polimérica interna à estrutura da fibra modificada após o tratamento por explosão a vapor.

Portanto, a utilização de polímeros termoplásticos reciclados com fibras vegetais de baixo custo apresentou-se como uma alternativa viável quanto aos aspectos econômicos; geração de novos materiais e redução de resíduos sólidos. Contudo, o processo de geração de produtos por meio de moldagem por injeção dos compósitos PET/fibra de cana-de-açúcar apresentou-se inviável devido às condições de altas temperaturas e pressões necessárias para obtenção do compósito, vindo a acarretar degradação das fibras (GANDARA, 2017).

Um outro estudo realizado por Zuccheratte, Freire e Lameiras (2017) avaliou a substituição do cascalho convencional por um cascalho sintético de PET na obtenção de um concreto advindo deste cascalho sintético, cimento e resíduo arenoso de formação ferrífera bandada (BIF's). O processo de aglomeração de partículas de resíduos arenosos usando PET reciclado foi obtido a partir de seis etapas.

A primeira foi o processo de mistura de flocos de PET e resíduo arenoso em caldo com as mesmas proporções de massa, seguido pelo aquecimento em estufa com a finalidade de derreter os flocos de PET; depois, foi realizada a moagem do corpo fundido para obtenção de partículas menores que 0,1mm. Na quarta etapa, o material obtido na moagem foi misturado com resíduo arenoso até obter a proporção de 25% de PET por 75% de resíduo arenoso. Na quinta, o material foi aquecido novamente para diluir as partículas de PET (ZUCCHERATTE; FREIRE; LAMEIRAS, 2017).

Por fim, foi realizado o esmagamento e peneiramento do material fundido, obtendo o cascalho sintético que foi caracterizado por unidade, material pulverulento, massa unitária, densidade, absorção de água e microscopia ótica. Já o concreto composto por resíduo arenoso, PET e cascalho sintético foi caracterizado por espectroscopia na região do infravermelho, espectroscopia de

fluorescência de raios X e granulometria (ZUCCHERATTE; FREIRE; LAMEIRAS, 2017).

Segundo Zuccheratte, Freire e Lameiras (2017), o concreto feito com cascalho sintético tem aproximadamente 65% de resíduo arenoso e 5% de PET. O concreto obtido apresentou uma resistência à compressão de 9 a 12MPa num período de 7 a 91 dias. Por apresentar uma alta utilização de resíduo arenoso, acredita-se que a combinação de PET reciclado e resíduo arenoso para composição do concreto o torna um material ecológico, podendo ser aplicado em alvenarias na região de Minas Gerais, onde as temperaturas estejam entre 5 e 37°C.

Um estudo realizado em 2018 desenvolveu um novo compósito polimérico. Estes compósitos, principalmente em formato esférico, vêm sendo utilizados com êxito em vários campos de pesquisa, como, por exemplo, na remoção de poluentes do ar e meios aquosos através do processo de adsorção (VIANTE, 2018, *apud* DAI *et al*; KOBAYASHI *et al*; LEI *et al*, LU *et al*).

O compósito foi preparado a partir do monômero de tereftalato (BHET), obtido a partir de um processo químico denominado “glicólise catalisada de PET pós-consumo”. Tal compósito, que é magnético, foi obtido por meio de uma síntese de nanopartículas de matriz polimérica e magnética via co-precipitação química. Em seguida, as amostras foram devidamente caracterizadas através dos processos de espalhamento dinâmico de luz, difração de raios X, magnetização e microscopia eletrônica de varredura. O novo compósito desenvolvido poderá ser aplicado na remoção de poluentes do meio ambiente, pois a microestrutura de formato esférico encontrada durante os processos de caracterização indicou que as microesferas magnéticas apresentaram poros e ferro uniformemente distribuídos em sua superfície (VIANTE *et al.*, 2018).

Um trabalho apresentado por Da Silva, Lins e Cotting (2019) mostrou o desenvolvimento de um processo para redução da granulometria dos *flakes* de PET comercializados. Foram utilizadas garrafas PET de água mineral sem rótulos e sem tampas, tendo as embalagens sido lavadas e, posteriormente, secadas por um período de 2 horas à temperatura ambiente. Depois, as garrafas foram cortadas em fragmentos com dimensões de aproximadamente 10x10mm. Em seguida, despejou-se, em um moinho, 5g do material PET fragmentado com 50mL de água, e realizaram-se quatro ciclos de moagem, com duração de 1

minuto cada. Através de um sistema de filtragem a vácuo, as amostras moídas foram lavadas até a obtenção de uma coloração clara. Por fim, o insumo gerado foi secado a uma temperatura de 60°C por um período de 3 horas (DA SILVA; LINS; COTTING, 2019).

O pó de PET produzido foi caracterizado através de espectrometria infravermelha por transformada de Fourier, utilizando a técnica ATR no aparelho Bruker Alpha, com software opus 7.2 em espectrofotômetro Perkin-Elmer. Ainda, foi aplicada a técnica de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), com calorímetro DSC-60 *Shimadzu* na faixa de temperatura de 30 a 300°C, com fluxo de nitrogênio de 50mL.min⁻¹. Também foi realizada a termogravimetria (TG), utilizando-se o equipamento DTG60H *Shimadzu*, com massa de amostra de 3,3mg, com razão de aquecimento de 10°C.min⁻¹ e com intervalo de 20 a 500°C, numa atmosfera dinâmica de nitrogênio com vazão de 10mL.min⁻¹. Os testes granulométricos foram realizados através de peneiras com 45, 100, 140, 200, 270 e 400Mesh (DA SILVA; LINS; COTTING, 2019).

Os resultados obtidos através das caracterizações realizadas no pó de PET concluíram que o processo de moagem aplicado aos fragmentos de PET não alterou as propriedades do polímero. Através deste processo, foi possível obter granulometria entre 0,354 a 0,037mm, ou seja, valor muito abaixo dos *flakes* de PET comercializados atualmente com granulometrias entre 3 e 9mm, potencializando a gama de aplicações deste material polimérico (DA SILVA; LINS; COTTING, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o desenvolvimento da telha de PET foi aplicada a metodologia de desenvolvimento integrado de produtos desenvolvida pelo NeDIP (núcleo de desenvolvimento integrado de produtos). O método de desenvolvimento integrado de produto foi aplicado até a fase do projeto preliminar, obtendo, como resultado final, o protótipo da telha de PET.

Como ponto de partida, a revisão dos conceitos de projeto integrado de produtos, contextualizados no capítulo 2, serviram para compreender todo o processo de desenvolvimento de um novo produto. Para isto, foi adaptada a metodologia de desenvolvimento integrado de produtos proposta por Back *et al* (2008) para o desenvolvimento do protótipo de uma telha sustentável tecnicamente viável.

Por se tratar de um projeto de baixa complexidade, não foi necessário seguir todas as etapas para o desenvolvimento do produto. A seguir, está descrita toda a metodologia de desenvolvimento do trabalho até a fase final, que, neste caso, foi o protótipo da telha de PET.

3.1 Metodologia de projeto de produto

O processo de desenvolvimento integrado de produtos proposto por Back *et al* (2008) se resume a três macrofases, as quais são subdivididas em outras oito fases: a primeira macrofase se constitui do planejamento, que possui uma fase denominada “planejamento do projeto”. Nesta fase, foi realizada a concepção do plano do projeto.

A segunda macrofase constitui na elaboração do projeto do produto, que se subdivide em quatro fases, que são denominadas, respectivamente, por projeto informacional; projeto conceitual; projeto preliminar e projeto detalhado. O projeto informacional será a primeira fase, sendo responsável por realizar o levantamento das informações relevantes ao produto. Espera-se, como resultado final, as especificações do projeto, que consiste basicamente no levantamento das suas necessidades, que são desdobradas em requisitos do projeto. A partir destes, são definidas as especificações do projeto, devendo-se levar em consideração alguns atributos básicos, do ciclo de vida e específicos.

O projeto conceitual, que é a segunda fase, corresponde ao conceito do produto, ou seja, será realizado o desenvolvimento da concepção do produto,

norteado pela sua função global. Nesta fase, será realizada a seleção da melhor concepção do produto em questão, levando-se em consideração fatores como transporte, manutenibilidade, materiais e fabricação, sustentabilidade e outros.

A terceira fase, caracterizada pelo projeto preliminar, será a definição do leiaute final do produto e a determinação da sua viabilidade técnica. Esta fase é marcada pela caracterização dos processos de fabricação; a elaboração da modelagem 3D do produto; a caracterização dos materiais de fabricação, entre outros. O resultado final desta fase será a viabilidade técnica do produto através da fabricação do protótipo.

A quarta fase, denominada por Back *et al* (2008) como “projeto detalhado”, não será contemplada neste trabalho, visto que sua proposta é prosseguir até a elaboração do protótipo. Do mesmo modo, a terceira macrofase, denominada de “implementação do lote inicial”, ficará como proposta para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

A Figura 22 apresenta o modelo de metodologia adotado para o desenvolvimento da telha de PET. O modelo contempla duas macrofases e quatro fases, respectivamente, sendo que cada fase apresentará um resultado final como saída, permitindo o andamento do processo até a última fase, cujo resultado final será a elaboração do protótipo da telha de PET tecnicamente viável.

Figura 22 - Representação do modelo de processo de desenvolvimento de produtos



Fonte: Adaptado de ROMANO (2003)

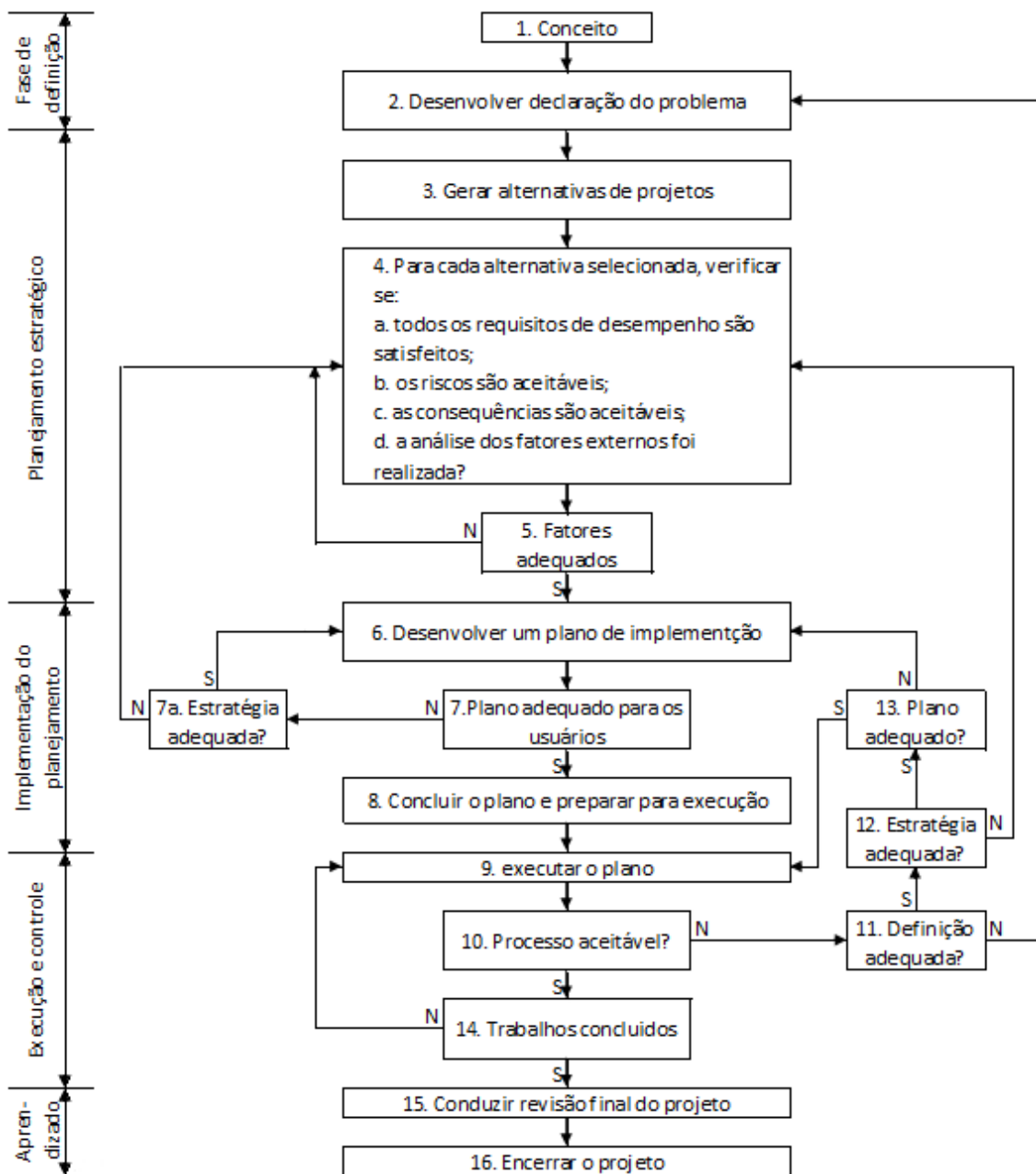
3.1.1 Planejamento do projeto

A fase de planejamento consiste, basicamente, na organização do trabalho a ser desenvolvido ao longo de todo o processo. A plataforma MS-Project foi aplicada para elaboração do gráfico de Gantt, responsável pela organização do desenvolvimento do projeto, bem como do produto. A mesma ferramenta será utilizada para o monitoramento da execução de cada fase do projeto.

Kerzner (2001) afirma que o gerenciamento de projeto se compreende em planejar, organizar, direcionar e controlar os recursos para satisfazer objetivos e metas específicas, num tempo relativamente curto. O gerenciamento do projeto adotado seguirá uma visão sistêmica, definida de acordo com Kerzner (2001), que consiste, basicamente, no desenvolvimento de um modelo caracterizado por entradas e saídas, identificando diretamente o fluxo de recursos necessários para atender aos objetivos estabelecidos.

A Figura 23, a seguir, ilustra o fluxograma de gerenciamento adotado no desenvolvimento do projeto até sua fase final. Com efeito, referido desenvolvimento é constituído por cinco etapas, sendo a primeira a fase de definição: conceitos, problemáticas e justificativas para se executar o projeto, as quais já estão estabelecidas no referencial teórico; a segunda é o planejamento estratégico: alternativas viáveis para execução do produto, sendo que tal etapa será estabelecida no projeto informacional; a terceira se trata da implementação do planejamento: definição do conceito e especificações do produto; já a quarta etapa trata-se da execução e controle: etapa de execução do conceito e fabricação do protótipo; por fim, tem-se a etapa de aprendizado: lições aprendidas e perspectivas futuras.

Figura 23 - Fluxograma de gerenciamento de projetos



Fonte: Adaptado de LEWIS (2000)

3.1.2 Projeto informacional

Esta fase será configurada a partir das necessidades apresentadas para o desenvolvimento da telha de PET. No primeiro momento, serão levantados os fatores de influência do projeto. Em seguida, serão apreciadas as necessidades do projeto e seus requisitos, que culminarão nas suas especificações.

A revisão bibliográfica serviu de pilar para o desenvolvimento do projeto informacional. Para o desenvolvimento da telha, foram utilizados como principais referências os trabalhos desenvolvidos por De Cerqueira (2003), que fabricou

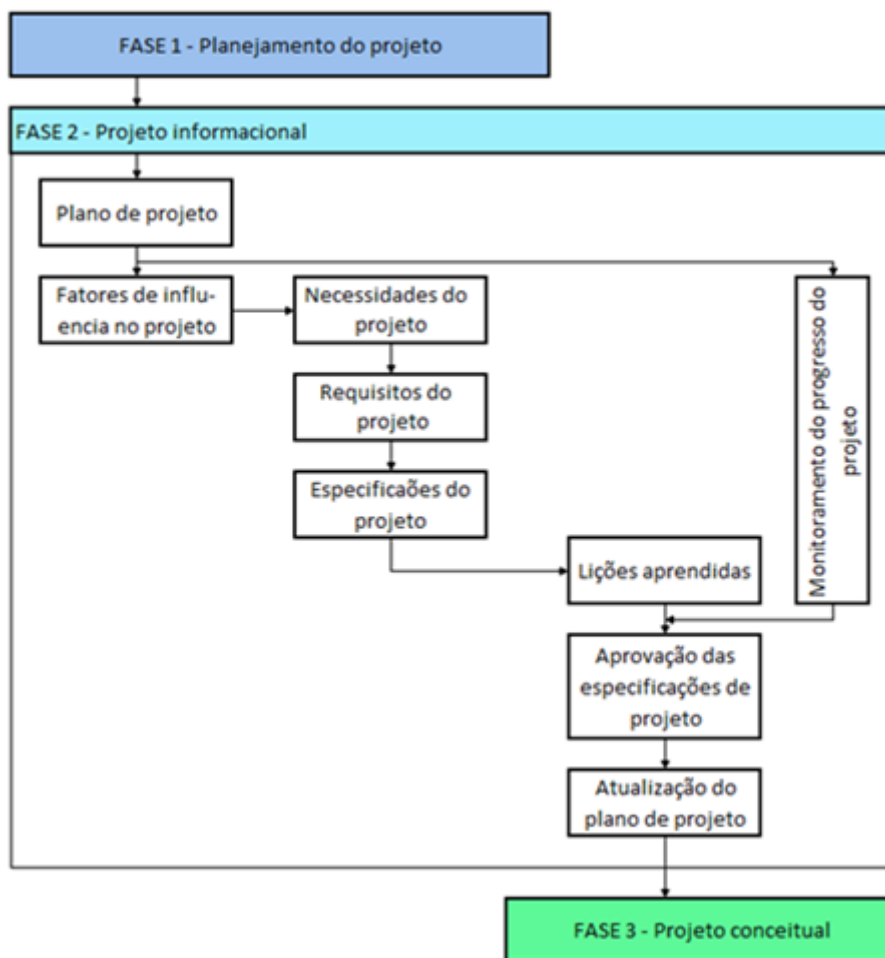
placas e telhas a partir da reciclagem de embalagens longa vida; Moraes *et al* (2010), que avaliaram a reciclagem de polímeros termoplásticos para fabricação de telhas e tijolos; Silva, Franciscon e Da Rocha (2010) e Almeida (2013), que relacionaram as vantagens econômicas e ecológicas de se utilizar telhas PET no lugar das telhas de cerâmica; Teske, Gonçalves e Nagalli (2015), que desenvolveram uma telha denominada GEPET.

Já para o desenvolvimento do material compósito que constituirá o protótipo final, como principais referências foram utilizados os trabalhos desenvolvidos por Zancanella *et al* (2017), que desenvolveram um compósito de PET e fibra de vidro com resina de poliéster; Gama (2017), que analisa as propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche; Maciel (2017), que compara as propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto entre compósitos reforçados com fibras de curauá e compósitos reforçados com fibras de vidro; Holguín (2015), que estuda o comportamento do PP e PET reciclados submetidos a intempéries e suas principais aplicações; e Silva (2004), que estuda a tenacidade de materiais compósitos não convencionais.

Outras referências complementares serviram para compor a base informacional do projeto, tais como Da Silva, Lins e Cotting (2019); Viante *et al* (2018); Gandara (2017); Zuccheratte, Freire e Lameiras (2017); Gorninski e Tonet (2016); Da Silva, De Brito e Veiga (2014); e Reis e Carneiro (2012).

A partir daí, as lições aprendidas foram listadas e, em seguida, foi aprovado e atualizado o plano do projeto. A aprovação do projeto informacional só se deu após completa a etapa de especificações do projeto, a qual é o principal resultado desta fase. A Figura 24 apresenta o fluxograma utilizado na fase referente ao projeto informacional.

Figura 24 - Fluxograma da fase de projeto informacional



Fonte: Adaptado de Back et al (2008)

3.1.3 Projeto conceitual

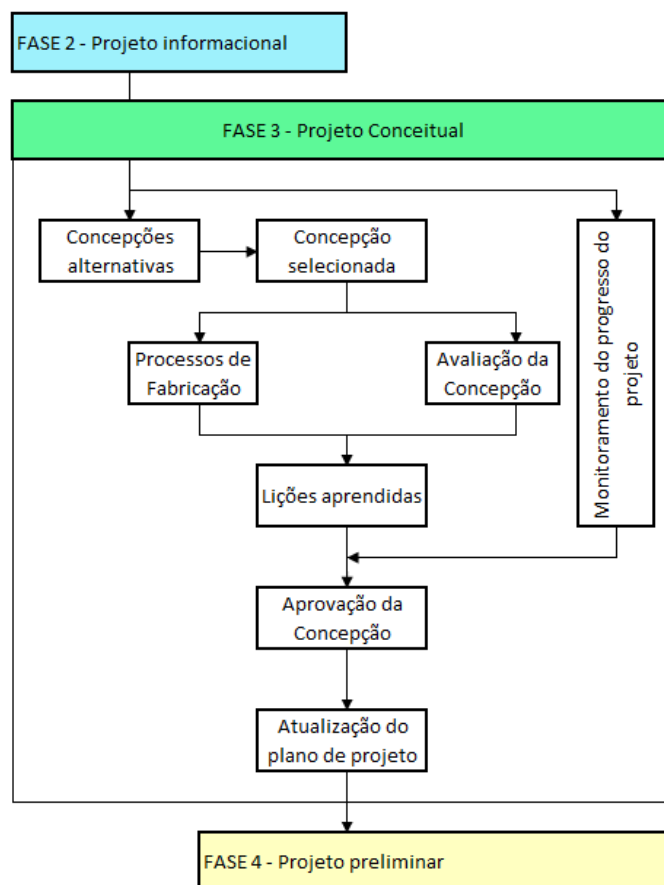
A concepção da telha de PET foi desenvolvida aqui. O propósito desta fase foi atingido através da realização de diversas tarefas, as quais tiveram a finalidade de estabelecer a estrutura funcional do produto, ou, em outras palavras, satisfazer sua função global. A seleção e avaliação do tipo de telha escolhido foram obtidas através da Matriz de Pugh, que gerou resultados a partir de critérios relacionados ao transporte, manutenibilidade, facilidade de fabricação, sustentabilidade e vida útil, por exemplo.

A matriz de Pugh é um método sistematizado de triagem que é feita por comparação, adotando-se como referência uma das concepções desenvolvidas de um produto já existente. O método é simples e fácil de ser aplicado e, além disso, permite evidenciar as melhores soluções e, conseqüentemente, a seleção do melhor conceito (BACK et al, 2008).

Esta fase foi munida pelo projeto informacional e se iniciou apresentando as concepções alternativas capazes de atender ao projeto. Em seguida, foi selecionada a concepção de maior potencial. Na etapa seguinte, foram confeccionados os corpos de prova e para realização dos ensaios mecânicos e análises termogravimétricas. Paralelamente, foi avaliada a concepção de acordo com os critérios adotados na matriz de Pugh através de uma equipe multidisciplinar do Ifes – Campus São Mateus, sendo este o principal resultado do projeto conceitual.

Por fim, estabeleceram-se as lições aprendidas, seguidas da aprovação da fase e atualização do plano de projeto. A Figura 25 mostra o fluxograma do projeto conceitual para melhor entendimento.

Figura 25 - Fluxograma da fase de projeto conceitual



Fonte: Adaptado de Back *et al* (2008)

3.1.3.1 Processo de fabricação dos corpos de prova

As garrafas PET foram obtidas na cantina do Ifes – Campus São Mateus, a qual funciona diariamente e descarta cerca de doze garrafas de refrigerante

por semana. Foram recolhidas 9 garrafas PET de 3,3L, cada uma, para fabricação de 3 matrizes tramadas.

Após o recolhimento das garrafas, elas foram devidamente higienizadas, com água corrente e detergente. Depois, foram retirados os rótulos e as tampas e, em seguida, armazenados em uma caixa de produtos recicláveis, enquanto as garrafas lavadas foram armazenadas de boca para baixo por um período de 4 horas, até que estivessem completamente secas.

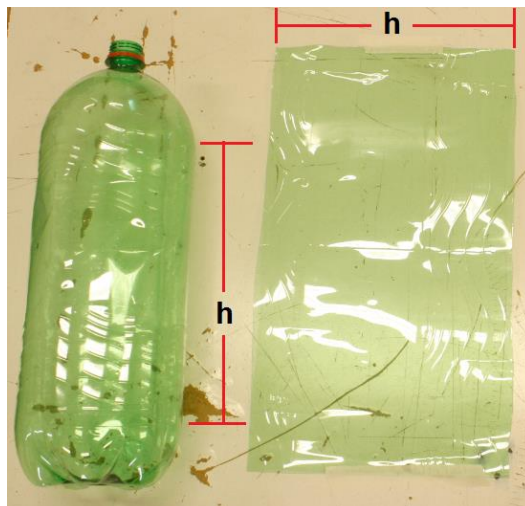
Após a higienização das garrafas, foram separados os materiais necessários para realizar o procedimento de fabricação das matrizes de PET. Os materiais utilizados foram:

- Escala;
- Estilete grande;
- Fita crepe estreita;
- Guilhotina para papel;
- Mesa de madeira.

As garrafas secas foram cortadas com estilete, retirando o topo e o fundo, seguidos de um corte transversal, formando uma folha, conforme a Figura 26. Com auxílio de uma guilhotina de papel¹⁰, a folha de PET foi esquadrejada nas 4 faces, formando um ângulo de aproximadamente 90°, deixando a folha com dimensões de 200,00 ± 0,25mm de largura por 300,00 ± 0,25mm de comprimento útil. Em seguida, as folhas de PET foram marcadas com estilete no sentido longitudinal (considerando o lado menor como base), com espaçamento de 5,00 ± 0,25mm, em ambos os lados, para facilitar o corte das tiras.

¹⁰ Capacidade para corte de cem (100) folhas de papel A4 simultaneamente.

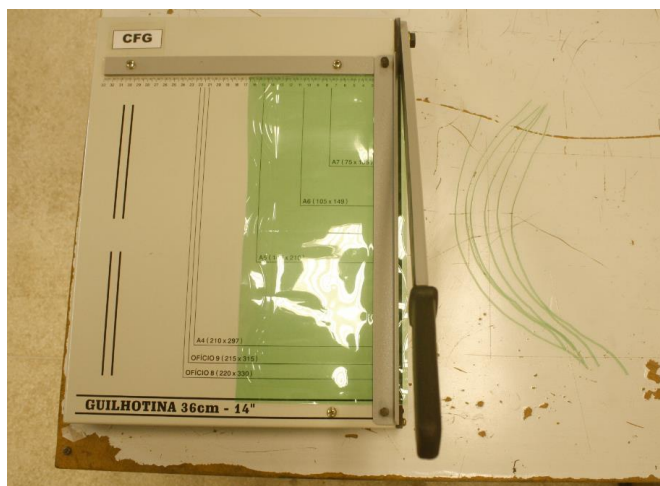
Figura 26 - Corte longitudinal da garrafa PET



Fonte: Autor

Após marcação, as folhas de PET foram, uma a uma, posicionadas paralelamente às bordas de referência da guilhotina de papel, tendo sido cortadas sobre as marcações longitudinais feitas anteriormente, como mostra a Figura 27. Cada folha de PET fornecia 40 ± 1 tiras de PET, com dimensões de $5,00 \pm 0,25\text{mm}$ de largura por $330,00 \pm 0,25\text{mm}$ de comprimento.

Figura 27 – Corte longitudinal das tiras de PET

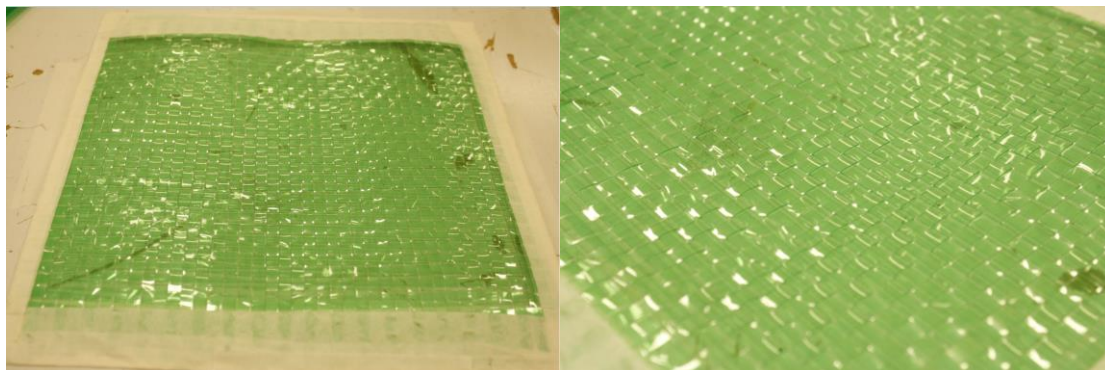


Fonte: Autor

Depois da preparação das tiras de PET, estas foram posicionadas lado a lado, transversalmente, sobre uma superfície de madeira plana, deixando um vão de aproximadamente 1mm de uma tira para outra. Então, as extremidades foram fixadas na mesa de madeira com fita crepe branca. Em seguida, foram tramadas conforme a Figura 28, uma sobre a outra, na posição longitudinal,

formando uma espécie de malha de PET, com dimensões aproximadas de 200mm de largura por 210mm de comprimento para a matriz 01 (MT#05.A01¹¹) e 240,00 ± 0,25mm de largura por 240,00 ± 0,25mm de comprimento para as matrizes 02 (MT#05.A02) e 03 (MT#05.A03).

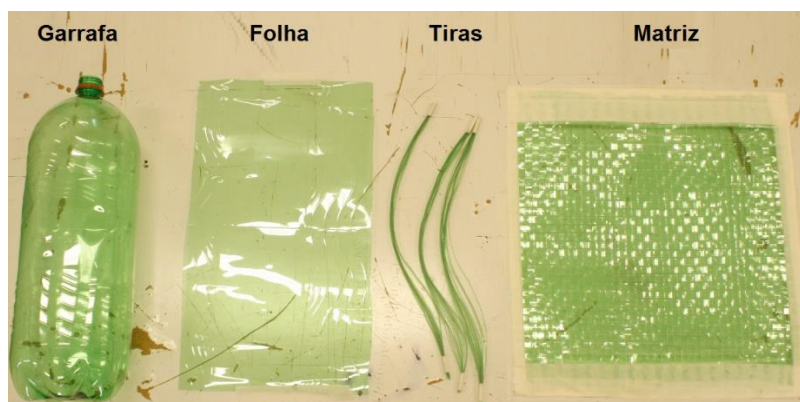
Figura 28 - Matriz de PET tramada 5x5mm



Fonte: Autor

Durante o processo de trama, as tiras frequentemente foram esticadas e ajustadas, tentando manter um padrão de afastamento de aproximadamente 1mm, tanto no sentido transversal, quanto no sentido longitudinal. Ao término, as arestas matrizes poliméricas de tiras de PET foram fixadas com fita crepe para evitar que a trama fosse desfeita. Cada matriz levou aproximadamente 3 horas para ser confeccionada, sendo que, ao todo, foram confeccionadas 2 matrizes para fabricação dos corpos de prova de flexão e impacto e 1 matriz para fabricação dos corpos de prova de tração e amostras para a TGA. A Figura 29 demonstra o processo de fabricação da matriz de PET.

Figura 29 - Processo de fabricação da matriz de PET



¹¹ O código MT#05.01 refere-se a: Matriz (M), Trama de 5x5mm (T#05), Amostra 01 (A01).

Fonte: Autor

Ao término do processo de fabricação da matriz, deu-se início ao processo de fabricação do compósito laminado. Primeiramente, foram separados todos os materiais necessários para se realizar a fabricação do compósito, conforme listados abaixo:

- Ambiente climatizado;
- Balança eletrônica de precisão, 0 a 100kg, com 3 casas decimais, da marca EOS 7020;
- Balança de precisão digital, 10mg a 220g, com 4 casas decimais da marca Shimadzu AUY 220;
- Cera desmoldante carnaúba Tec Glaze para resinas e fibras;
- Chapa pesada e uniforme para prensagem;
- Copos descartáveis;
- Endurecedor incolor de baixa viscosidade 630;
- Espátulas de polímero (2 unidades);
- Estilete grande;
- Fita crepe larga;
- Luvas descartáveis de látex;
- Papel toalha;
- Pás de madeira;
- Plástico de polipropileno;
- Resina epóxi incolor de alta viscosidade 2600 com proteção UV;
- Serra fita vertical;
- Soprador térmico;
- Tecido fibra de vidro;
- Tesoura grande.

Inicialmente, foi separado um pedaço de granito com dimensões de 500mm de largura por 500mm de comprimento e posicionado sobre uma base firme. Em seguida, foi realizado o corte de dois pedaços do plástico polipropileno nas dimensões de, aproximadamente, 250mm de largura por 250mm de comprimento e fixadas as quatro laterais de um pedaço sobre a superfície lisa da pedra de granito com fita crepe.

Depois de fixado o polipropileno sobre a pedra – Figura 30, utilizando papel toalha, foram passadas três demãos de cera desmoldante sobre toda a superfície do plástico, uniformemente, em intervalos de, aproximadamente, dois minutos. O mesmo procedimento foi realizado no outro pedaço do polipropileno não fixado sobre a base de granito.

Figura 30 - Fixação do polipropileno no granito liso



Fonte: Autor

Paralelamente, foram cortados dois pedaços do tecido de fibra de vidro com dimensões aproximadas de 250mm de largura por 250mm de comprimento. Em seguida, tanto a matriz de PET quanto os dois pedaços de tecido de fibra de vidro foram pesadas na balança de precisão digital com quatro casas decimais da marca SHYMADZU e modelo AUY220. A Figura 31 ilustra o procedimento realizado na fabricação do compósito 01 (CMT#05.01¹²): primeiro, a balança foi tarada para eliminar o peso do copo; depois, foram pesadas apenas as fibras de vidro e, em seguida, realizou-se aferição de peso da matriz.

¹² O código CMT#05.01 refere-se a: Compósito (C), Matriz (M), Trama de 5x5mm (T#05), Amostra 01 (A01).

Figura 31 - Pesagem das fibras e matriz



Fonte: Autor

Logo após, iniciou-se o processo de preparação da resina e catalisador: primeiro, foram vestidas as luvas de látex e, com uma pá de madeira, retirou-se a resina epóxi, despejando-a no copo plástico. Em seguida, foi verificado o peso na balança de precisão digital já tarada. Logo depois, foi adicionado o catalisador na proporção de 45% da massa de resina e pesado, conforme ilustra a Figura 32.

Figura 32 - Pesagem da resina e catalisador

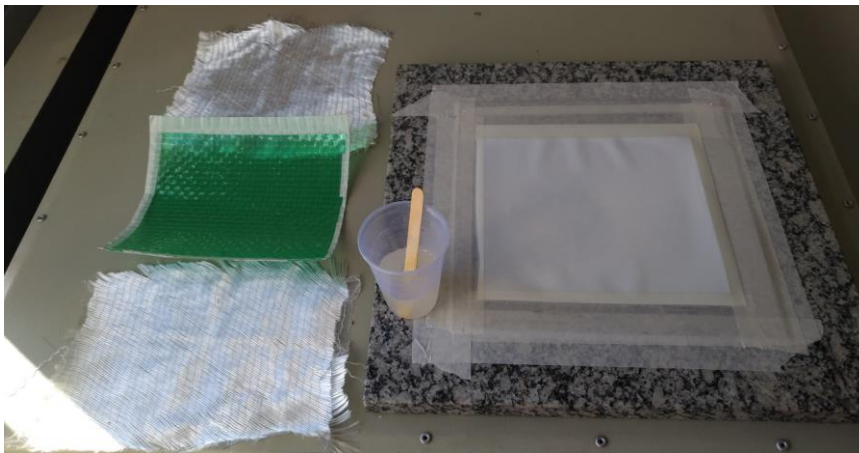


Fonte: Autor

O procedimento foi repetido até que a solução de resina mais catalisador atingisse a proporção de 1:1 em relação ao somatório das massas de fibra e matriz. A solução de resina e catalisador foi agitada com a pá de madeira por aproximadamente cinco minutos, deixando a solução completamente homogênea. Com a resina devidamente preparada, o processo de laminação do

compósito pôde ser iniciado, sendo que a Figura 33 ilustra todos os componentes necessários para realizar a montagem do compósito, quais sejam, a base de plástico polipropileno com uma fina camada de desmoldante; dois tecidos de fibra de vidro; a matriz tramada de PET e a solução de resina epóxi com catalisador em suas devidas proporções.

Figura 33 - Fase inicial de preparação do compósito



Fonte: Autor

A laminação se inicia direcionando-se o soprador térmico na direção perpendicular ao plástico polipropileno, numa distância de aproximadamente 250mm, até aquecer levemente a superfície, de maneira uniforme. Em seguida, foi espalhada uma primeira camada homogênea de resina sobre a superfície do plástico polipropileno fixado na base de granito, utilizando-se a espátula de polímero, como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Primeira camada de resina epóxi

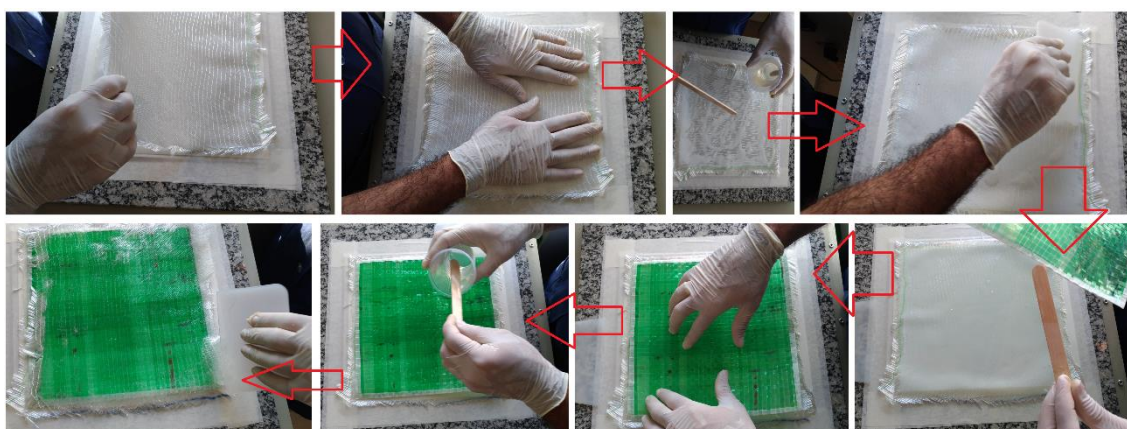


Fonte: Autor

Em seguida, foi posicionado um dos dois tecidos de fibra de vidro sobre a camada de resina (primeira camada de fibra). Cuidadosamente, a fibra foi

pressionada até a resina começar a encharcar o tecido. Subsequentemente, foi adicionada mais uma fina camada de resina (segunda camada de resina), que foi espalhada cuidadosamente sobre o tecido, seguindo o sentido da fibra para não desfiar. Na sequência, foi posicionada a matriz de PET e uma camada de resina epóxi sobre ela (terceira camada de resina). Neste momento, a espátula foi pressionada sobre a matriz para que a resina acumulada debaixo dela penetrasse nos pequenos orifícios existentes entre os espaçamentos das tiras de PET, conforme com a Figura 35.

Figura 35 - Primeira camada de fibra de vidro, segunda camada de resina epóxi, aplicação da matriz de PET e terceira camada de resina



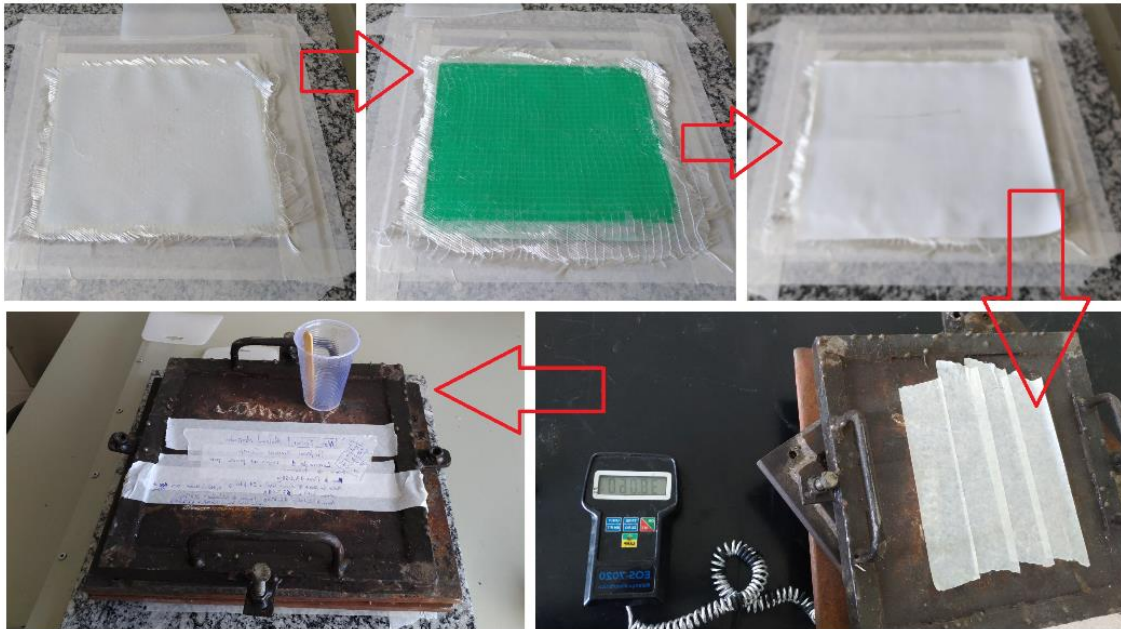
Fonte: Autor

Na continuação do processo, o segundo tecido de fibra de vidro (segunda camada de fibra) foi posicionado sobre a matriz encharcada de resina e, assim como na primeira camada de fibra, ela foi pressionada até encharcar. Depois, adicionou-se a última camada de resina (quarta camada de resina), desta vez por cima do segundo tecido de fibra (segunda camada de fibra) e espalhada levemente com a espátula, até que se formou uma lâmina de resina uniforme.

Na sequência, foi posicionado o segundo plástico de polipropileno sobre a última camada de resina. Na medida em que ele foi posicionado, utilizou-se uma espátula limpa em conjunto ao soprador térmico para correr sobre o laminado, eliminando possíveis bolhas originadas durante o processo. Antes das chapas com superfície uniforme de prensagem serem posicionadas sobre o laminado, elas são pesadas e levemente aquecidas com o soprador térmico e, em seguida, posicionadas sobre o laminado, conforme ilustrado na Figura 36.

Os pesos foram colocados lentamente, buscando uniformidade na distribuição do peso, adotando-se a proporcionalidade de aproximadamente $1,0\text{Kg}/\text{cm}^2$.

Figura 36 - Posicionamento da segunda camada de tecido de vidro, quarta camada de resina, posicionamento do polipropileno, e adição de peso sobre o laminado

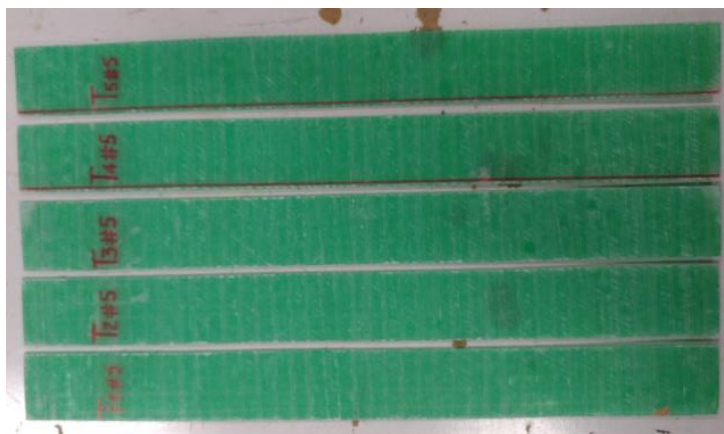


Fonte: Autor

Todo o processo foi realizado em um ambiente devidamente climatizado, a uma temperatura de 20°C , por um período de 24 horas. Após este período, a carga foi retirada e o compósito laminado foi armazenado em local apropriado por um período de 72h para finalizar a cura. Depois deste tempo, foi verificada a espessura final do laminado, o qual foi cortado conforme as normatizações específicas para cada corpo de prova, de acordo com o método de ensaio.

Para os ensaios de tração, os corpos de prova foram cortados com $25,00 \pm 0,25\text{mm}$ de largura e $250,00 \pm 0,50\text{mm}$ de comprimento, em conformidade com a norma ASTM D3039/D, totalizando 5 amostras. O corte foi realizado em uma serra fita vertical, levando-se em consideração o sentido de laminação das fibras, adotando-se a orientação simétrica e balanceada. Após o corte, os corpos de prova foram devidamente identificados, como mostrado na Figura 37. A simbologia T (1 a 5) #5 significa: corpo de prova de tração (T); número do corpo de prova (1 a 5) e #5 (trama da matriz com $5 \times 5\text{mm}$).

Figura 37 - Corpos de prova para ensaios de tração



Fonte: Autor

Os ensaios dos corpos de prova foram realizados em uma máquina universal da marca TIME GROUP, localizada no laboratório de ensaios dos materiais no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES, *Campus São Mateus*, com velocidade de 2mm/min. Utilizou-se extensômetro e um *strain gauge* de 50,000mm, com precisão de 0,001mm. Tanto os dados quanto as curvas Stress-Strain geradas pelo software de aquisição de dados foram salvos no computador para análise. A Figura 38 elucida o procedimento de ensaio.

Figura 38 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de tração

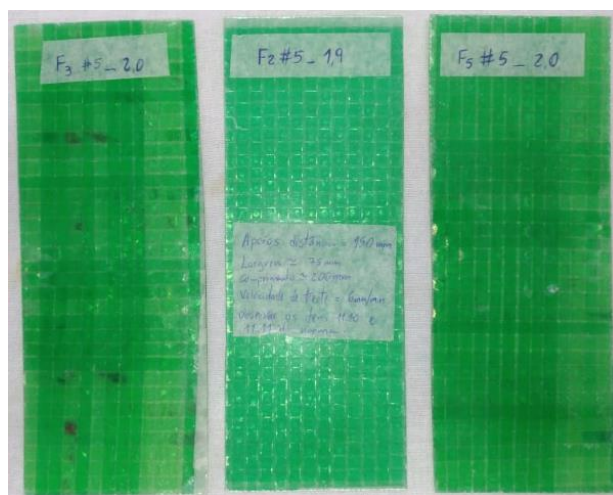


Fonte: Autor

Já os corpos de prova para os ensaios de flexão foram cortados com, aproximadamente, 75mm de largura e 200mm de comprimento, de acordo com

a norma ASTM C393/C393M, totalizando 5 amostras. Os cortes foram realizados adotando-se os mesmos critérios dos corpos de prova de tração. Após o corte, os corpos de prova foram devidamente identificados como mostrado na Figura 39. A simbologia F1#5-2,0 significa: corpo de prova de flexão (F); número do corpo de prova (1); #5 (trama da matriz com 5x5mm) e espessura de 2mm. Utilizou-se o mesmo equipamento dos ensaios de tração. O método utilizado foi o de três pontos, com distância entre os apoios na ordem de 150mm.

Figura 39 - Corpos de prova para ensaio de flexão



Fonte: Autor

Antes de iniciar o ensaio, foram registradas as medidas de comprimento, largura e espessura das amostras em três locais na seção de teste. Em seguida, aplicou-se uma pré-carga. Os ensaios foram realizados com velocidade de 6mm/min, durante o período de 6min. A Figura 40 demonstra o procedimento sendo executado.

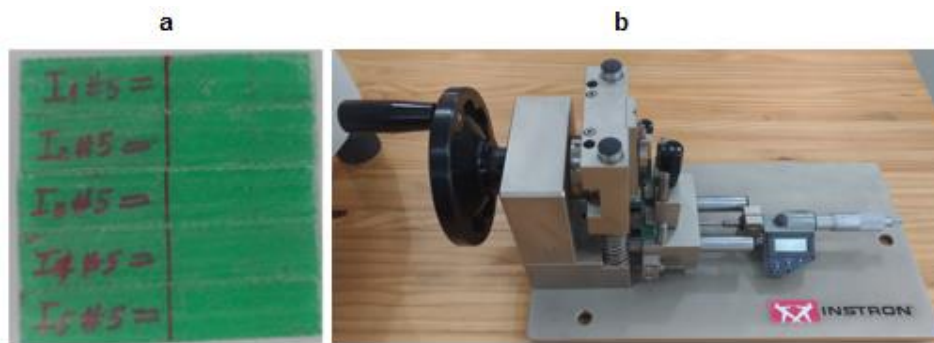
Figura 40 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de flexão



Fonte: Autor

Já os corpos de prova para os ensaios de impacto foram cortados com $12,70 \pm 0,20\text{mm}$ de largura e $63,50 \pm 2,00\text{mm}$ de comprimento, segundo a norma ASTM D256, totalizando 5 amostras com entalhe e 5 amostras sem entalhe. Os cortes também foram realizados na serra fita e considerando a orientação simétrica das fibras. Os entalhes, por sua vez, foram realizados na máquina específica de entalhes – Figura 41b. Após o corte, os corpos de prova de impacto foram identificados adotando a simbologia I1#5, conforme a Figura 41a.

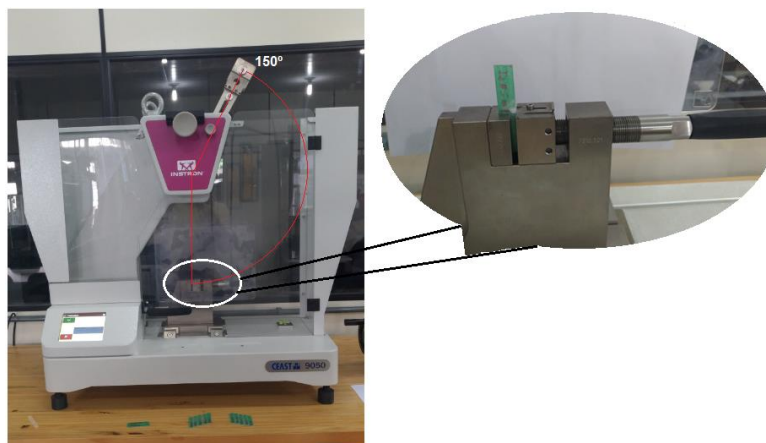
Figura 41 - Corpos de prova para ensaio de impacto (a). Máquina de fazer entalhes (b).



Fonte: Autor

Os corpos de prova foram submetidos ao método de impacto Izod através da máquina de impacto pendular da INSTRON, modelo CEAST 9050, utilizando martelo com energia 5,5J, que foi liberado da posição de 150° , como ilustrado na Figura 42. A razão para a utilização do teste de impacto Izod foi a facilidade na sua utilização e o fato de que ele pode ser instrumentado, permitindo, assim, a obtenção de informações referentes ao processo de absorção e dissipação de energia.

Figura 42 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de impacto



Fonte: Autor

A deformação que atua no martelo durante o impacto será adquirida por um sistema de aquisição de dados (DAS), que converte os sinais em percentual de energia absorvida em comparação com a energia potencial de impacto expressa em valor percentual, a energia absorvida pela amostra e a resiliência expressa em termos de energia compartilhada.

Por fim, foi separada uma amostra de cada laminado do compósito fabricado, as quais foram encaminhadas para realizar as análises de termogravimetria (TGA). As análises foram feitas nas amostras dos compósitos com massas de aproximadamente 25 ± 1 mg sob fluxo de Argônio. A temperatura foi variada de 20 a 900°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Os testes foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais, Coordenadoria de Metalurgia, Ifes - Campus Vitória em uma STA 449F3 da NETZSCH, de acordo com a Figura 43.

Figura 43 - Análise termogravimétrica TGA no equipamento STA 449F3 da NETZSCH



Fonte: NETZSCH (2019)

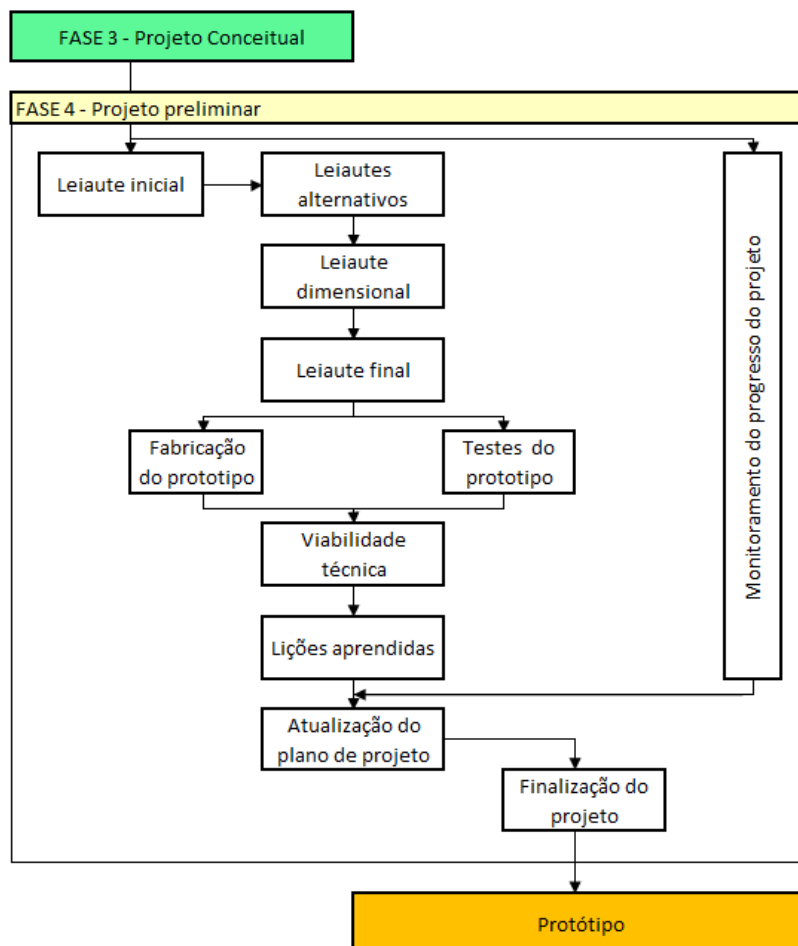
3.1.4 Projeto preliminar

Tratando-se da fase final do projeto proposto, aqui foi estabelecido o leiaute final da telha de PET, além de ser determinada a viabilidade técnica, que foi incorporada aos projetos informacional e conceitual deste produto. Back *et al* (2008) estabelece como resultado principal desta fase a viabilidade econômica e, inclusive, a trata como um fator determinante para passar para a fase de projeto detalhado. Contudo, o produto proposto por este trabalho se limita à elaboração do protótipo da telha de PET, de modo que, neste sentido, a

confeção do protótipo físico foi considerada como principal resultado deste trabalho, atendendo aos objetivos propostos.

A Figura 44 apresenta o fluxograma do projeto preliminar adotado para o desenvolvimento da telha de PET. A fase constituiu a elaboração dos leiautes do produto até a definição do leiaute final através da utilização de ferramentas de modelagem 3D, tendo sido utilizada a plataforma do Autodesk Inventor. Depois, seguiu-se para a fabricação da telha de PET e os testes, etapas estas que antecederam a etapa de viabilidade técnica. A fase se finalizou com as lições aprendidas e a atualização do final do projeto até a entrega do protótipo, que foi o resultado final de todo o projeto.

Figura 44 - Fluxograma da fase de projeto preliminar



Fonte: Adaptado de Back et al (2008)

3.1.4.1 Processo de fabricação da telha de PET

A ideia é conseguir reproduzir o mesmo compósito fabricado para os corpos de prova, seguindo os mesmos métodos e critérios de fabricação. Para

fabricação das telhas foram recolhidas 20 garrafas PET de 3,3L cada, provenientes da cantina do Ifes, Campus São Mateus.

As garrafas foram higienizadas com água e detergente. Na sequência, foram retirados os rótulos e tampas, que foram armazenados junto aos materiais recicláveis. Já as garrafas foram lavadas e armazenadas de boca para baixo por um período de 1h até que a maior parte da água escoasse.

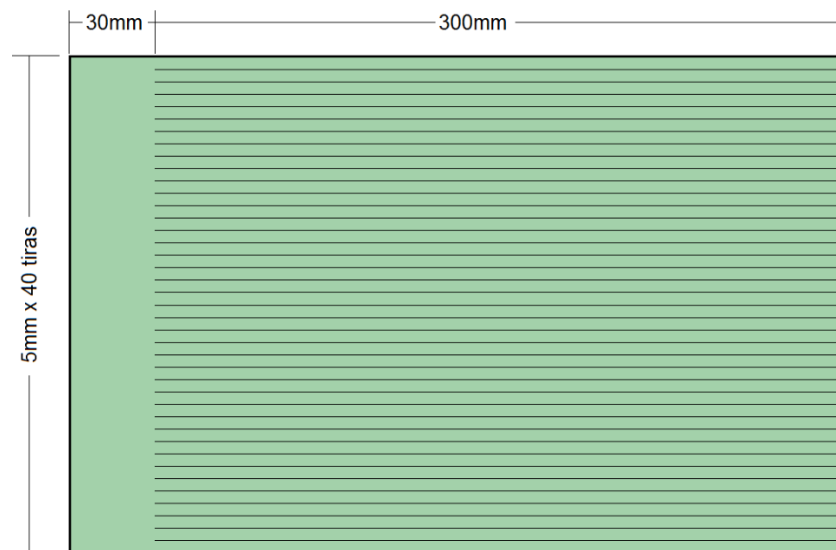
Em seguida, foram separados os materiais para fabricação da matriz de PET. Os materiais utilizados foram:

- Cola instantânea;
- Dispositivo de madeira para tecelagem;
- Escala;
- Estilete grande;
- Fita crepe estreita;
- Guilhotina para papel;
- Lixa 120;
- Luvas de látex;
- Mesa de madeira;
- Pás de madeira.

Com o uso do estilete, foram retirados o fundo e o topo das garrafas PET e, em seguida, foi realizado um corte transversal, conforme a Figura 26. Em seguida, foram realizados o esquadrejamento da folha de PET e a marcação longitudinal com estilete, do mesmo modo como feito na fabricação dos corpos de prova.

Após a marcação, as folhas de PET tiveram suas extremidades menores lixadas com lixa de granulometria 120 grãos/cm² para facilitar o processo de soldagem das tiras mais adiante. As folhas de PET foram, então, posicionadas uma a uma, paralelamente às bordas de referência da guilhotina de papel – Figura 27, sendo então cortadas sobre as marcações longitudinais feitas anteriormente. Contudo, três folhas de PET foram cortadas de forma especial, obedecendo ao desenho ilustrado pela Figura 45, tendo elas sido fixadas com pregos na base do dispositivo de madeira. Cada folha de PET forneceu 40 ± 1 tiras de PET com dimensões de $5,00 \pm 0,25$ mm de largura por $330,00 \pm 0,25$ mm de comprimento.

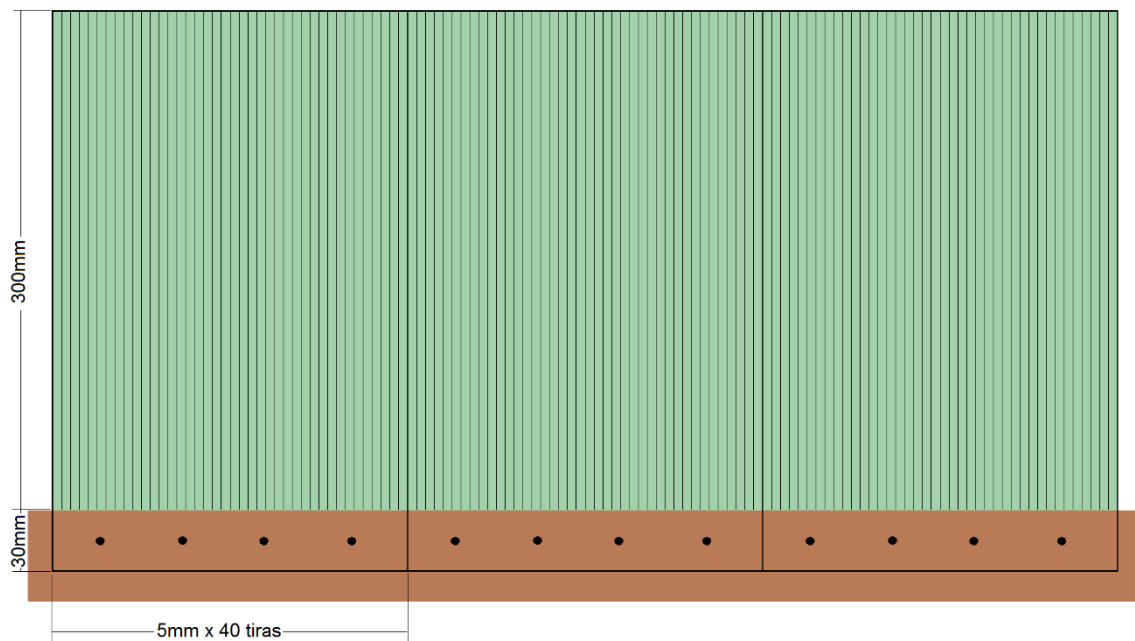
Figura 45 - Corte especial das folhas de PET



Fonte: Autor

Depois da preparação das três folhas de PET cortadas parcialmente em tiras, foram elas posicionadas lado a lado no dispositivo de madeira e fixadas com 4 pregos equidistantes, de acordo com a Figura 46. Como as tiras das três primeiras folhas de PET não foram cortadas totalmente, não existiu vão entre as tiras.

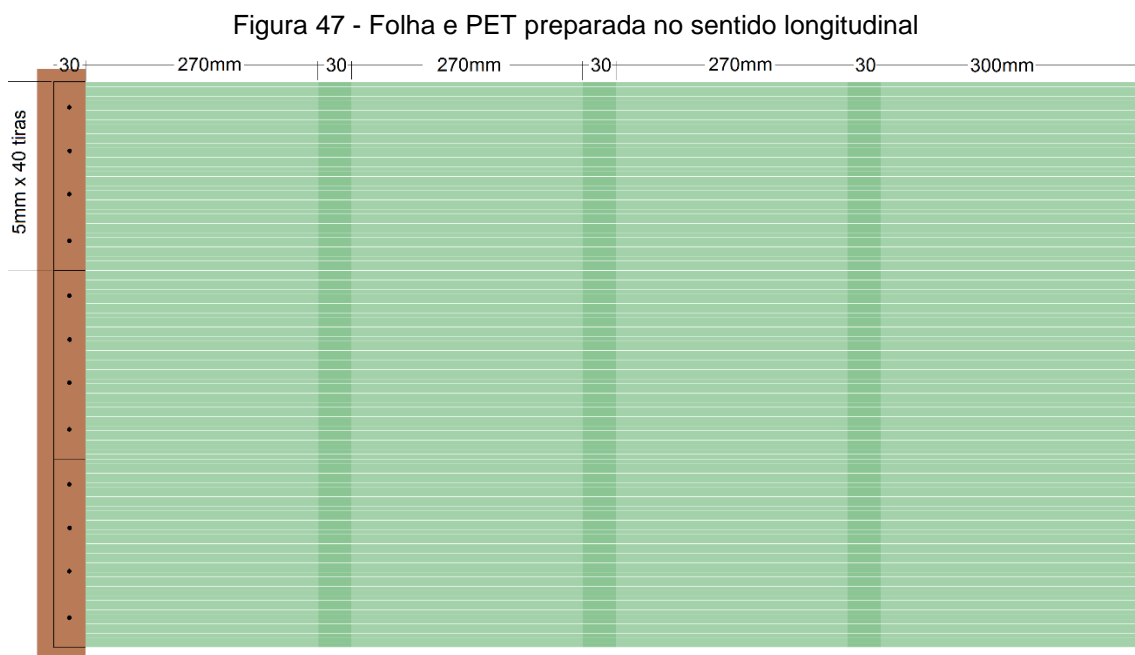
Figura 46 - Tiras fixadas no dispositivo de madeira



Fonte: Autor

Em seguida, foram coladas tiras totalmente cortadas (como as que foram desenvolvidas para a fabricação da matriz dos corpos de prova) sobre as

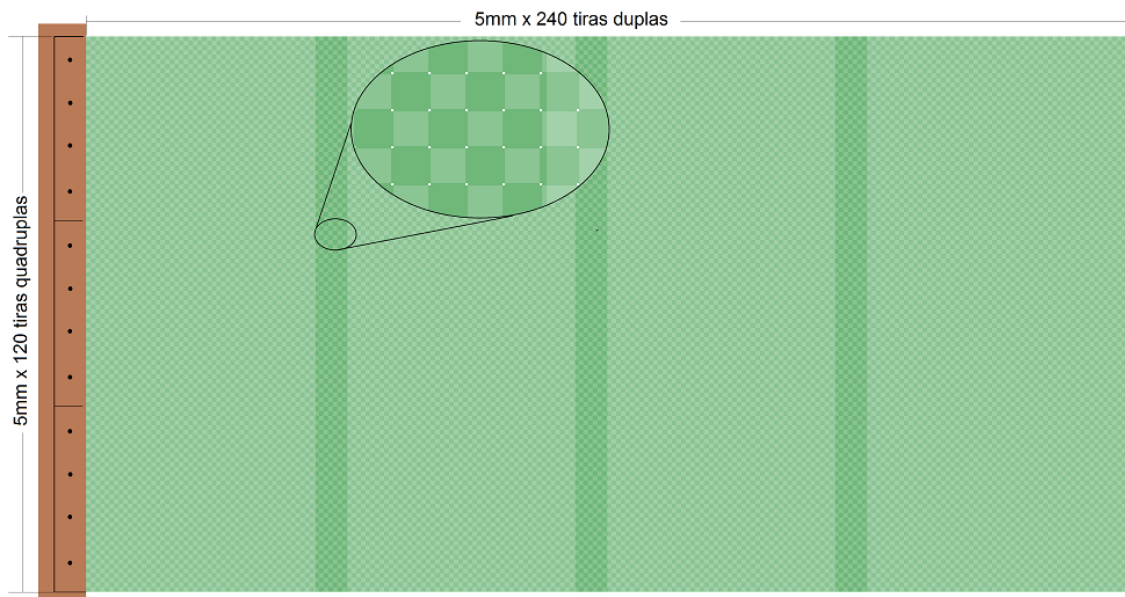
extremidades das tiras parcialmente cortadas, como demonstrado na Figura 47. O processo se repetiu até que fossem coladas todas as tiras, formando uma folha de PET fixa na madeira em uma das extremidades, com dimensões de 60mm de largura por 1200mm de comprimento. A região mais escurcida representa a região onde foi aplicada cola instantânea para unir as tiras, sendo a área de soldagem de aproximadamente 150mm².



Fonte: Autor

Em seguida, foram tramadas uma sobre a outra na posição transversal, formando uma espécie de malha de PET, com dimensões aproximadas de 600,00±0,50mm de largura por 1200±1mm de comprimento para a matriz. Foram confeccionadas um total de 980 tiras, sendo que destas, 120 com dimensão 5,00±0,25mm de largura por 1200±1mm de comprimento (tiras quadruplas) posicionadas na horizontal, e 240 com dimensão de 5,00±0,25mm de largura por 600,00±0,50mm de comprimento, posicionadas na vertical, como ilustra a Figura 48.

Figura 48 - Matriz de PET para fabricação da telha



Fonte: Autor

Durante o processo de trama, as tiras foram esticadas e ajustadas, garantindo um afastamento de, aproximadamente, 1mm no sentido transversal. A cada 20 tiras transversais tramadas, foi aplicada cola instantânea nas extremidades laterais para evitar seu deslocamento e desmontagem. O processo de fabricação completo da matriz levou aproximadamente 48h.

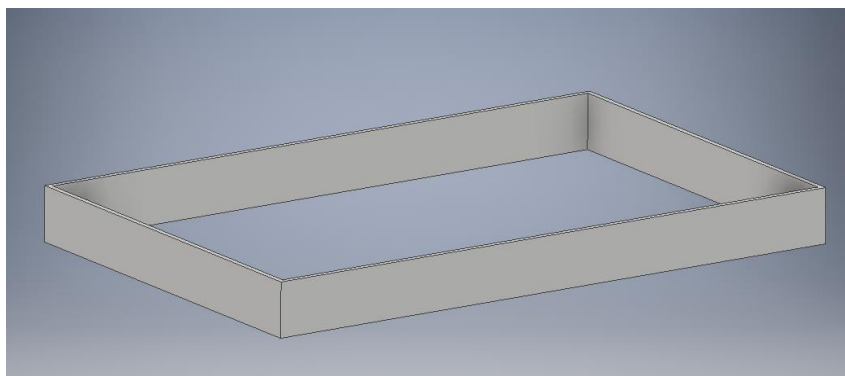
Paralelamente ao processo de fabricação da matriz da telha de PET, foi realizada a fabricação dos moldes de prensagem e conformação para dar forma à telha. Para fabricação dos moldes foram utilizados:

- Arco de serra;
- Areia fina;
- Betoneira;
- Broca 8mm;
- Brita zero;
- Carrinho de mão;
- Cera desmoldante carnaúba Tec Glaze para resinas e fibras;
- Cimento;
- Colher de pedreiro;
- Estilete grande;
- Furadeira;
- Lápis de marceneiro;

- Madeirite;
- Martelo;
- Mesa de marcenaria;
- Morsa;
- Pá quadrada;
- Papel toalha;
- Pedaco de telha ondulada larga de fibrocimento com 1100mm de largura por 600mm de comprimento;
- Plástico polipropileno;
- Pregos;
- Ripas de madeira com espessura de aproximadamente 10mm;
- Serra circular;
- Vergalhão com diâmetro nominal de aproximadamente 4,2mm;
- Vergalhão com diâmetro nominal de aproximadamente 8 mm;

O molde inferior foi o primeiro a ser fabricado. O processo de fabricação iniciou-se marcando as regiões de corte das ripas com lápis de marceneiro; em seguida, foi realizado o corte de quatro ripas de madeira com a serra circular, sendo duas ripas com 100mm de largura por 1108mm de comprimento e duas ripas com 100mm de largura por 608mm de comprimento. Após o corte, as ripas foram pregadas com pregos pequenos, dando forma a um caixote vazado com dimensões internas de 708mm de comprimento por 1108mm de largura, conforme Figura 49.

Figura 49 - Caixote do molde inferior

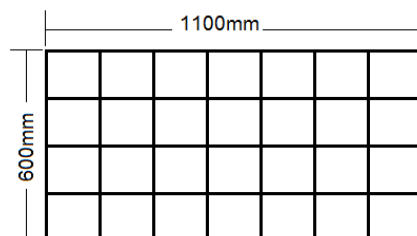


Fonte: Autor

Depois, foram cortados 8 pedaços do vergalhão de 4,2mm com 700mm de comprimento e 5 pedaços com comprimento de 1100mm. Para o corte

utilizou-se o arco de serra, e os vergalhões foram cortados, apoiados e presos na morsa, que se encontrava fixa na mesa de marcenaria. Em seguida, os vergalhões foram tramados equidistantes, conforme ilustrado pela Figura 50.

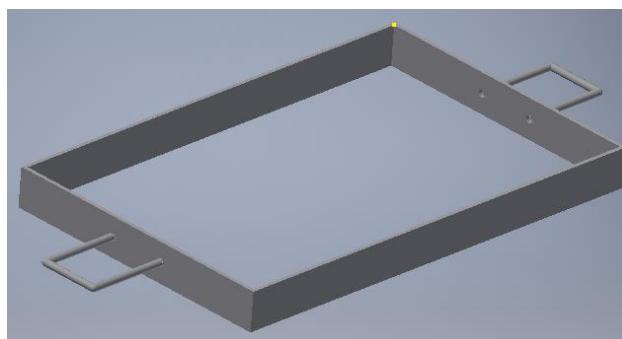
Figura 50 – Trama de vergalhão para fabricação dos moldes



Fonte: Autor

As alças foram cortadas e dobradas em formato de “U”, sendo confeccionadas com dois pedaços de vergalhão de 8mm com 550mm de comprimento. O dobramento foi realizado na morsa, deixando dois lados com 200mm de comprimento e o centro com 150mm de comprimento. Na sequência, com uma furadeira montada com broca de 8mm, foram realizados 4 furos, sendo 2 distanciados a 150mm em cada ripa de menor comprimento. Os furos foram feitos para realizar o encaixe das alças, como visto na Figura 51, a seguir:

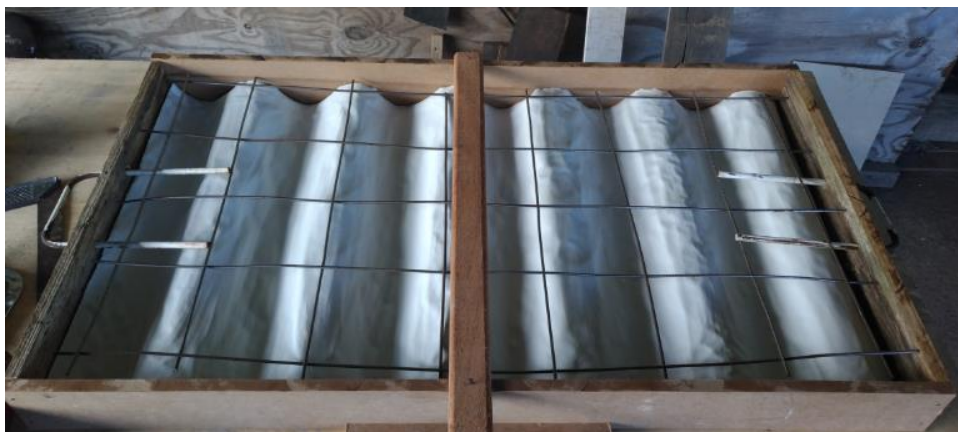
Figura 51 - Caixote do molde inferior com alça



Fonte: Autor

O caixote foi posicionado sobre um madeirite. Na sequência, foi posicionado o pedaço de telha de fibrocimento dentro do caixote. Sobre a telha, foi posicionada uma folha de plástico polipropileno, que foi cortada com estilete, cobrindo toda a área da telha e seguindo sua geometria ondulada. Sobre o plástico foram passadas três demãos de cera desmoldante de carnaúba, em um intervalo de 2 minutos e utilizando papel toalha. Em seguida, o caixote foi fixado no madeirite com quatro ripas, sendo uma em cada lateral. Por fim, foi fixada com prego uma ripa na face superior e centralizada nas laterais maiores. A Figura 52 ilustra o caixote pronto para receber a massa de concreto.

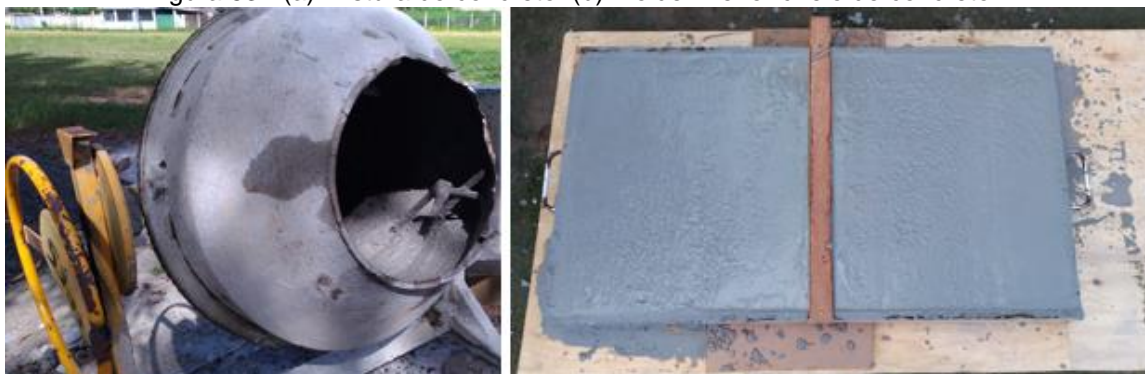
Figura 52 - Molde inferior pronto para receber o concreto



Fonte: Autor

A preparação do traço¹³ foi feita em uma betoneira – Figura 53a. Primeiro, foi adicionada brita número zero; em seguida, areia fina peneirada; depois, cimento e, por fim, água dentro da betoneira, onde tais materiais foram misturados até atingir o ponto. Como a intenção foi fabricar um traço forte, foram utilizadas as proporções de 1 lata de cimento de 18 litros, 1 lata de areia, 1,5 latas de brita e 10 litros de água. Após finalizado o processo de mistura, a massa foi despejada no carrinho de mão com auxílio de uma pá quadrada e, em seguida, no molde, com auxílio de uma colher de pedreiro. A Figura 53b ilustra o molde inferior cheio de massa.

Figura 53 - (a) Mistura do concreto. (b) molde inferior cheio de concreto.



Fonte: Autor

A preparação do molde superior seguiu o mesmo procedimento da fabricação do molde inferior, exceto pela dimensão do caixote e o posicionamento das alças. O caixote do molde superior ficou com 150mm de altura. Para este molde, foram fabricadas 4 alças no formato de “Ω”, sendo posicionadas na parte superior, uma em cada canto, após o despejar o concreto.

¹³ Termo utilizado na construção civil para composição da massa de concreto.

Após derramar o concreto nos moldes, ambos passaram por um processo de cura ao ar livre durante um período de 96 horas. Depois, foram desmoldados e transportados para o laboratório, onde foi realizada a fabricação dos compósitos.

O processo de laminação da telha seguiu os mesmos procedimentos e parâmetros de fabricação adotados para os corpos de prova, sendo que a única diferença foi a de que, no lugar da chapa pesada para prensagem, foi utilizado o molde para dar forma à telha, além de que, por óbvio, as dimensões da matriz, tecido de fibra de vidro e plástico polipropileno foram maiores. A Figura 54 ilustra a preparação destes materiais antes do início da laminação.

Figura 54 - Preparação dos materiais para laminação da telha de PET



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Doravante, serão apresentados os principais resultados obtidos na elaboração da telha de PET, sendo que o principal foi a sua fabricação a partir do desenvolvimento de um compósito que utiliza uma matriz tramada do referido material, revestida com fibras de vidro tramadas e agregadas com resina epóxi.

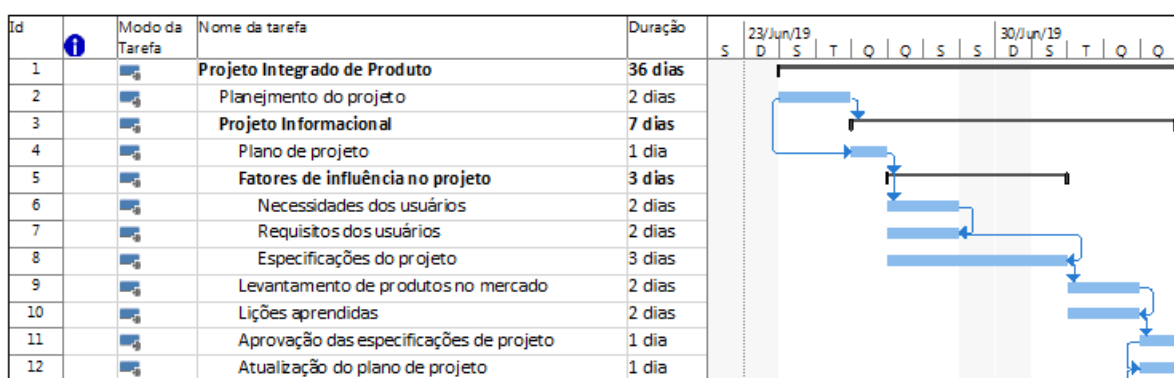
Assim como a metodologia, os resultados e discussão serão apresentados numa sequência lógica, iniciando-se pelo planejamento, seguido pelos projetos informacional, conceitual e preliminar. Dentro de cada etapa será apresentada uma discussão referente à tomada de decisão para continuidade do projeto até a confecção do protótipo da telha de PET.

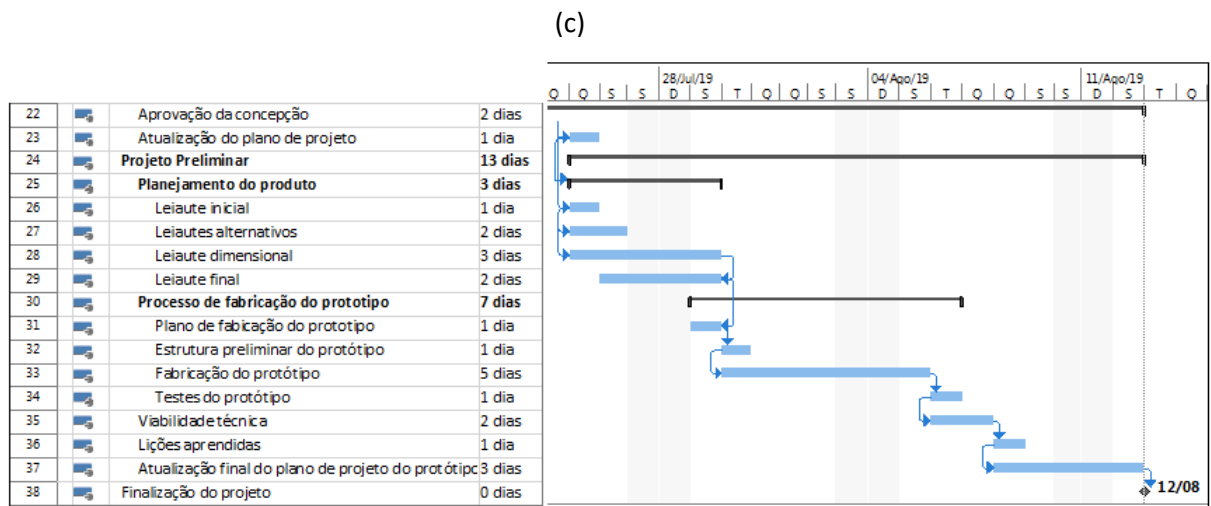
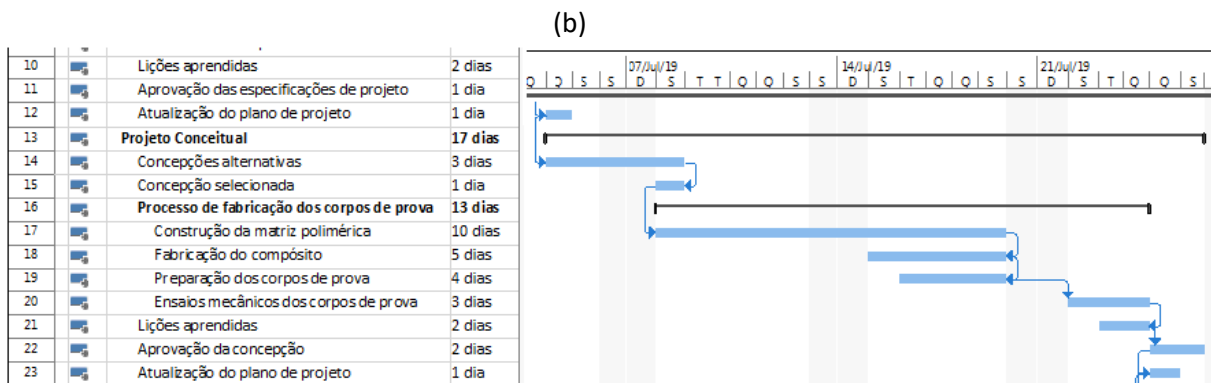
4.1 Resultados do planejamento do projeto

O planejamento utilizado consiste, basicamente, na organização do trabalho desenvolvido ao longo de todo o processo. O gráfico de Gantt foi utilizado de modo a facilitar o entendimento da organização do projeto de desenvolvimento do produto. O Gráfico 1 demonstra o planejamento do projeto realizado na plataforma MS-Project 2013, sendo que a mesma ferramenta foi utilizada para o monitoramento da execução de cada fase do projeto, seguindo o fluxograma de gerenciamento de projetos proposto na metodologia - Figura 23.

Gráfico 1 - Gráfico de Gantt – (a) planejamento do projeto, (b) Planejamento do projeto conceitual, (c) Planejamento do projeto preliminar

(a)





Fonte: Autor

4.1.1 Lições aprendidas

A previsão inicial de execução do projeto, desde a fase inicial até a confecção do protótipo, foi de 36 dias úteis, considerando cada dia com 4 horas. Contudo, como em qualquer projeto, algumas etapas de execução levaram mais tempo que o previsto inicialmente. Um exemplo foi a etapa referente à fabricação dos corpos de prova, situada dentro da fase de projeto conceitual. O atraso se deu pelo fato de coincidir a data de execução ao período de recesso escolar, que durou 10 dias. Neste período, a mão de obra foi impactada, tendo uma redução de 75%.

Apesar dos imprevistos e alguns atrasos, o projeto foi executado com sucesso dentro do prazo previsto de 36 dias úteis, o que foi possível graças ao efetivo monitoramento e realocação das atividades de acordo com as demandas. Por exemplo, na etapa de confecção dos corpos de prova, foi realocada 100% da mão de obra após o período de recesso escolar, visto que esta atividade ficou muito comprometida. A previsão era de que esta atividade durasse 13 dias, com

2 pessoas trabalhando durante 4 horas por dia. Contudo, devido ao recesso, a mesma atividade foi desenvolvida em 13 dias, com 1 pessoa trabalhando 5h por dia, durante 10 dias e, posteriormente, 3 pessoas trabalhando 6 horas por 3 dias.

Outro fator não previsto no planejamento foi a disponibilidade dos equipamentos para realizar os ensaios. Foi necessário realocar e prolongar o prazo ao máximo para conseguir cumprir o planejamento inicial. Mesmo assim, ocorreu um atraso de 2 dias para entrega de todos os resultados dos ensaios dos corpos de prova, o qual, no entanto, não comprometeu o desenvolvimento das atividades subsequentes, nem o prazo final de entrega do projeto.

Durante a execução e preparação dos corpos de prova, umas das etapas consiste no corte das tiras de PET para confecção da matriz do mesmo material. Zancanella *et al* (2017) realizou o corte das tiras com um fabricante de vassouras, que utilizou um aparato semelhante a uma tesoura grande. Durante a execução desta etapa, foi verificado que este procedimento poderia ser realizado com uma guilhotina de papel. O procedimento reduziu em 50% o tempo para se realizar o mesmo corte nas tiras, além de oferecer maior confiabilidade dimensional das tiras de PET.

Outros procedimentos estão descritos com mais detalhes nos resultados obtidos nos projetos informacional, conceitual e preliminar a seguir.

4.2 Resultados do projeto informacional

A etapa informacional é a discussão dos conceitos existentes, ou seja, a revisão de trabalhos já existentes na literatura, cujo objetivo central é obter um ponto de partida para o desenvolvimento do projeto. Discutir e analisar os projetos já existentes faz parte da etapa informacional, cujo objetivo é ter um ponto de partida para o desenvolvimento de um produto.

Diante disso, esta etapa foi de extrema importância para se definir as reais necessidades para a fabricação do produto. Questões relacionadas aos tipos de telhas e seus materiais utilizados foram amplamente discutidas para que estas informações fossem levadas como opções para a definição na próxima etapa, definida como projeto conceitual.

A discussão diante do grande volume de material plástico que é descartado diariamente mostra a potencialidade em reaproveitar parte deste material rejeitado na fabricação de um produto renovável de alta durabilidade.

Com efeito, o impressionante volume de garrafas PET que são descartadas anualmente induziu o desejo em contribuir com o desenvolvimento sustentável do Brasil.

Buscar possibilitar a implementação de um produto altamente reciclável como o PET na fabricação de telhas tecnicamente sustentáveis vai de encontro aos mesmos objetivos de De Cerqueira (2003); Moraes (2010); Silva, Franciscon e Da Rocha (2010); Almeida (2013) e Teske, Gonçalves e Nagali (2015), os quais buscaram desenvolver produtos que pudessem contribuir, de alguma maneira, para diminuir o valor percentual de resíduos decorrentes de garrafas PET sem comprometer o desempenho dos mesmos.

Em resumo, estes autores identificaram um grande potencial, tanto no ponto de vista técnico e sustentável, quanto no ponto de vista econômico da utilização de garrafas PET e outros produtos recicláveis na confecção de telhas. O que mais se destacou foi o trabalho de Teske, Gonçalves e Nagali (2015), no qual desenvolveram um modelo de telha 3D denominado GEPET. O modelo selecionado foi o Colonial Gigante, com uma capa polimérica feita de resíduo de PET envolvendo o resíduo de gesso derivado da construção civil.

Os autores do referido trabalho concluíram que é possível fabricar uma telha que atenda aos requisitos técnicos e, além disso, seja 100% fabricada de material reciclável. A seleção da telha foi realizada através de uma matriz contendo 10 possibilidades, que foram avaliadas segundo critérios técnicos como durabilidade, peso, método construtivo, rendimento, mercado, manutenção, descarte e critério ecológico.

Apesar de terem criado um modelo de referência em 3D, apresentando todas as características técnicas da telha GEPET, não foi gerado um protótipo para demonstrar as reais dificuldades e/ou características do produto. Por esse motivo, seria de fundamental importância que o projeto tivesse continuidade para que ao menos um protótipo fosse criado, a fim de demonstrar a real potencialidade de fabricação deste produto.

Antes de qualquer possibilidade de criação da telha de PET, foi feita uma verificação das principais características técnicas dos materiais que constituíram o produto final. Sendo assim, algumas pesquisas foram realizadas, dentre elas, o limite de resistência à tração, módulo de elasticidade, características de desgaste e resistência química.

A Ensinger, empresa especializada em produtos plásticos de alta performance, qualifica o PET como um material que fornece alta resistência, alta rigidez e dureza, absorção de umidade muito baixa, boa resistência à deformação, baixo coeficiente de atrito e baixo desgaste à abrasão, boa resistência química contra ácidos, boa adesão e habilidade de soldagem.

A percepção quanto às propriedades mecânicas dos materiais compósitos foi construída a partir dos trabalhos desenvolvidos por Zancanella *et al* (2017); Gama (2017); Maciel (2017); Holguín (2015); Wang, *et al* (2010b) e Silva (2004).

Na caracterização realizada por Zancanella *et al* (2017), obteve-se uma resistência à tração média de 30,5MPa e limite elástico de 3,24GPa para o compósito composto por matriz polimérica tramada de PET com fibra de vidro e resina poliéster. Neste estudo, constatou-se que a resistência à tração foi inferior ao limite de resistência para o PET puro, apresentando um comportamento frágil, já que não houve uma deformação plástica considerável.

Para Callister e Rethwisch (2013), o limite de resistência à tração para o PET puro não processado está entre 48,3 a 72,4MPa. Sendo assim, por que o compósito desenvolvido por Zancanella *et al* (2017) apresentou resultados inferiores? Segundo os autores, a justificativa se deu ao fato de que o compósito foi desenvolvido através de um método artesanal, apresentando descontinuidades que atuaram no material, fazendo com que houvesse redução de sua resistência.

Gama (2017) avaliou que o comportamento mecânico sob tração e flexão dos corpos de prova constituídos de fibra de carbono e fibra de vidro reforçados por matriz polimérica apresentaram alta resistência à tração e flexão, destacando que os compósitos reforçados com fibra de carbono apresentaram maior resistência. A fibra de vidro apresentou tensão máxima de tração de 210,44MPa e de flexão na ordem de 284,79MPa.

Maciel (2016) concluiu, através do ensaio de impacto Izod, que o compósito reforçado com 30% de fibra de vidro apresentou um comportamento frágil idêntico ao comportamento do compósito reforçado com fibras naturais, e destacou que as energias de absorção ao impacto para os compósitos reforçados com 30% de fibra de vidro foram elevadas.

Holguín (2015) confirma que o PET pode ser aplicado em substituição a materiais metálicos, visto que apresenta boa resistência mecânica. Contudo, durante o processo degradativo no polímero, ocorreu descoloração, fissuramento, perda de brilho e queda de resistência mecânica quando submetido a ambientes agressivos. Segundo o autor, é necessário realizar testes de resistência estática para simular cargas de vento e neve, assim como ensaios de envelhecimento, dureza e impacto para concluir a respeito da aplicabilidade do PET com maior propriedade.

Wang *et al* (2010) caracterizaram a estrutura morfológica das resinas epóxi através da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier e microscopia eletrônica de transmissão. Avaliou as temperaturas de transição vítreas e realizou análises de degradação térmicas em meios agressivos por meio da termogravimetria.

Silva (2004) estudou compósitos reforçados com fibras vegetais de bambu, eucalipto, sisal e o bambu em seu estado natural. Para ele, os compósitos reforçados com fibras de sisal foram os que apresentaram a maior estabilidade térmica, apresentando degradação inicial a partir de 200,4°C e melhor conjunto de propriedades, com módulo de ruptura de 14,26MPa e tenacidade no impacto na ordem de 0,97KJ/m².

Para seleção do projeto conceitual, será necessário um embasamento referente às características das principais telhas comercializadas no mercado brasileiro. Para isso, foram selecionadas algumas das principais telhas, buscando aquelas que apresentam maiores diferenças relativas entre a forma e o tipo de material.

Telhas de cerâmica apresentam inúmeros formatos diferentes, como por exemplo, portuguesa, romana, romana plana, uruguaia, holandesa, colonial, entre outras. Estas telhas apresentam uma boa absorção térmica, garantindo um bom conforto de temperatura ao ambiente. Por serem pesadas, estas telhas necessitam de uma estrutura de sustentação reforçada.

A telha fotovoltaica é basicamente constituída por uma telha de cerâmica com células fotovoltaicas embocadas no seu corpo. Esse tipo de telha apresenta as mesmas características que as telhas de cerâmica, exceto pela capacidade de produzir energia.

As telhas de policarbonato, PET, vidro, concreto e esmaltadas geralmente seguem os formatos das telhas de cerâmica. No caso das telhas de policarbonato, apresentam boa resistência e transparência. São maleáveis, leves e proporcionam eficiente proteção térmica e anti-UV, o que fornece maior vida útil em relação às telhas de vidro ou PVC. Porém, sua manutenção deve ser cautelosa, tomando cuidado para não ocasionar riscamento e corrosão.

As telhas de PET são comercializadas em diversas cores, inclusive translúcida. Utilizam material reciclado e, por isso, são consideradas ecológicas. Proporcionam boa resistência e são leves, de modo que não necessitam de uma estrutura de sustentação reforçada. Além disso, suportam temperaturas elevadas e não apresentam porosidade, o que é característico das telhas de cerâmica, o que faz com que diminua a propagação de fungos e mofos.

Telhas de vidro permitem a entrada de luz natural, proporcionando leveza ao ambiente. Na maioria das vezes são utilizadas em combinações com telhas de cerâmica ou concreto. Sua fragilidade é a principal desvantagem, já que podem apresentar trincas com certa facilidade.

Em relação às telhas de concreto, apresentam grande variedade de cores, um bom conforto térmico e boa durabilidade. Sua utilização obriga a aplicação de resina para impermeabilização, já que são muito porosas. Apesar da porosidade, são mais impermeáveis que as telhas de cerâmica, porém, são mais pesadas, necessitando de uma estrutura de sustentação muito reforçada. Além disso, apresentam baixa resistência ao vento.

As telhas esmaltadas são telhas de cerâmica com acabamento feito de vítrea colorida, conferindo maior resistência, durabilidade e aparência, além de deixar a cerâmica mais impermeável, o que diminui a possibilidade de infiltrações e o surgimento de mofos e fungos.

As de fibra de vidro são fabricadas no formato ondulado, apresentando boa luminosidade natural, o que auxilia na economia de energia. Em relação às telhas de vidro, são de fácil manipulação, leves e de alta resistência. As telhas de fibrocimento também são fabricadas no formato ondulado, mas podem ter a forma de kalhetão. Elas são leves, duráveis, resistentes e de baixo custo. Sua maior desvantagem é que absorve o calor com facilidade, deixando o ambiente interno quente.

Telhas de fibras vegetais oferecem as mesmas vantagens que as telhas de fibrocimento, com o acréscimo de serem ecologicamente corretas e resistentes a intempéries climáticas. Já as telhas de PVC se destacam por serem mais leves que as telhas de cerâmica, concreto, metal e fibrocimento. São comercializadas nos formatos ondulados ou em estilo colonial. Versatilidade, reciclabilidade, facilidade de limpeza, resistência ao fogo e resistência a mudanças climáticas são suas principais características. Porém, têm baixo isolamento acústico e térmico, deixando o ambiente interno quente.

As telhas metálicas, que podem ser encontradas em alumínio, cobre, liga de metais ou folhas de aço comum ou galvanizado, têm como característica a resistência, durabilidade e leveza. Têm como vantagem a possibilidade de vencer grandes vãos e são comercializadas na forma de kalhetão, necessitando de fixadores.

A telha gravilhada apresenta conforto térmico, não absorve a umidade, não irradia calor e apresenta resistência às intempéries climáticas, além de ter uma fácil instalação e não necessitar de estruturas reforçadas de sustentação. Entretanto, devido ao seu revestimento de camada de rocha moída com acabamento cerâmico, apresenta elevado custo.

As telhas termoacústicas proporcionam um ambiente silencioso e com temperaturas internas agradáveis, sendo mais leves e com melhor isolamento térmico/acústico quando comparadas com as telhas de cerâmica e concreto. Elas são compostas por duas telhas de aço preenchidas com material isolante térmico, podendo ser de isopor, lã de vidro ou de rocha e poliuretano. Esse tipo de telha também é conhecido como telha sanduíche.

4.2.1 Lições aprendidas

Todas as informações consideradas relevantes ao projeto foram apontadas e convertidas em requisitos de projeto. Assim, o desenvolvimento do trabalho na etapa seguinte fica facilitado. Também foram relacionadas as principais informações relativas aos possíveis conceitos empregados no projeto. Em outras palavras, esta etapa se resumiu a organizar e consolidar todas as informações pertinentes ao projeto e, conseqüentemente, ao produto pretendido.

Os estudos serviram para criar uma concepção inicial, ou concepção de referência para o desenvolvimento do compósito e, conseqüentemente, da telha

de PET. Diante de todas estas informações, partiu-se do princípio de que o compósito desenvolvido por Zancanella *et al* (2017) possui um grande potencial conceitual, podendo ser aprimorado, principalmente no que tange ao processo de fabricação. A partir daí, foram verificadas as reais necessidades para a concepção do produto.

Como resultado, as necessidades apresentadas para o desenvolvimento da telha de PET foram:

- Levantamento dos fatores de influência do projeto;
- Necessidades do projeto e seus requisitos.

Os fatores de influência do projeto são:

- As propriedades mecânicas dos materiais;
- As propriedades térmicas dos materiais;
- Fatores ecológicos;
- O mercado;
- O rendimento;
- O tempo de fabricação;
- Os métodos construtivos;

Para atender às necessidades do projeto, o produto deve:

- Possibilitar economia de energia;
- Ser de fácil instalação;
- Ser de fácil manutenção;
- Ser de fácil transporte;
- Ser durável;
- Ser fácil de armazenar;
- Ser leve;
- Ter boa absorção térmica;
- Ter boa aparência;
- Ter boa resistência mecânica;
- Ter proteção contra incidência de raios ultravioleta;

Diante os fatores de influência do projeto e as necessidades do projeto, temos a matriz de requisitos do projeto identificada na Tabela 5:

Tabela 5 - Atributos necessários para o desenvolvimento do produto

Classes de atributos	Atributos	Comentários
Atributos básicos	Funcionalidade	Deve atender sua função
	Boa aparência	Deve ter boa aparência
	Robustez	Deve ser leve
	Ecológico	Deve ser ecológica
Atributos do ciclo de vida	Fabricabilidade	Deve ser de fácil fabricação, precisa e com o menor custo e tempo possível
	Mantenabilidade	Deve ser fácil e rápida
	Transportabilidade	Deve ser de fácil transporte
	Usabilidade	Deve ser de fácil instalação
	Reciclabilidade	Deve ser um produto sustentável
	Armazenabilidade	Deve ser de fácil armazenagem
Atributos específicos	Durabilidade	Deve ser durável
	Geometria	Forma, arranjo, dimensões, espaço
	Energia	Deve possibilitar economia de energia
	Materiais	Propriedades mecânicas, térmica, proteção UV

Fonte: Adaptado de FONSECA (2000)

4.3 Resultados do projeto conceitual

A princípio, foi analisado o ponto de referência, ou seja, o compósito desenvolvido por Zancanella *et al* (2017). Tendo como base os relatos dos próprios autores, foram identificadas potenciais melhorias do processo. Dentre elas, destaca-se o processo de corte das tiras de PET, que no primeiro momento foi realizado com tesoura manual. Já como ponto de melhoria, propôs-se realizar o corte das tiras com uma guilhotina, o que melhorou tanto a qualidade quanto reduziu o tempo de confecção das tiras.

Outra ação importante para a confecção das tiras foi adotar uma geometria padrão das garrafas PET utilizadas. Basicamente, foram utilizadas garrafas com perfil cilíndrico liso, ou seja, sem relevos ou geometria diferenciada ao longo do corpo da garrafa PET, o que facilitou a sistematização do processo de corte das tiras e trama da matriz de PET.

Outra melhoria agregada à concepção inicial foi a forma de realizar a laminação da matriz: ao invés de utilizar uma prensa mecânica, foi utilizado o conceito de força aplicada por unidade de área de contato, ou seja, a pressão exercida no laminado.

4.3.1 Concepções alternativas

Para a seleção da concepção do projeto da telha de PET, foi adotada uma linha de seleção bem parecida com a que Teske, Gonçalves e Nagali (2015) adotaram. Utilizou-se a matriz de decisão de Pugh como método sistematizado de triagem feita por comparação. A concepção adotada como referência foi a fabricação da telha de PET a partir do compósito desenvolvido por Zancanella *et al* (2017) e aprimorado neste trabalho, comparadas a produtos já existentes.

O método de Pugh é simples e fácil de ser aplicado, além disso, permite evidenciar as melhores soluções e, conseqüentemente, a seleção do melhor conceito (BACK *et al*, 2008). Para efeitos de otimização, foram selecionadas 10 concepções possíveis para fabricação da telha de PET.

As concepções foram obtidas de forma sensorial, a partir de um estudo com vários produtores de telhas dos mais diversos materiais, verificando os principais modelos disponíveis no mercado. Os critérios adotados foram muito parecidos com os adotados por Teske, Gonçalves e Nagali (2015), sendo absorção de calor, armazenabilidade, boa aparência, boa resistência mecânica, durabilidade, energia, método construtivo, manutenção, proteção UV, ecológica, peso, transportabilidade, reciclagem, mercado e o rendimento.

Para efeito de conhecimento, a matriz foi adotada levando-se em consideração as geometrias em que as telhas são comercializadas. Cada tipo equivale a uma concepção diferente. A Tabela 6 apresenta os códigos de identificação criados para não ocupar espaço de texto demasiado dentro da matriz. A telha de referência utilizada foi a proposta de telha em conformidade com as necessidades do projeto, e os requisitos necessários confrontados com os principais conceitos de telhas existentes no mercado brasileiro.

Tabela 6 - Códigos de referência para os tipos de telhas e suas geometrias adotadas

Tipo de Telha	Geometria	Código
Cerâmica	Romana	T.Cer
Polycarbonato	Colonial	T.Pol
PET	Colonial	T.PET
Vidro	Colonial	T.Vid
Concreto	Romana	T.Con
Esmaltadas	Colonial	T.Esm
Fibra de vidro	Ondulada estreita	T.F.Vid
Fibrocimento	Ondulada larga	T.Fib

Fibra vegetal	Colonial	T.F.Veg
PVC	Colonial placa	T.PVC
Metálica	Calhetão	T.Met
Gravilhada	Romana	T.Gra
Termo acústica	Sanduíche	T.T.Acu
Fotovoltaica	Plana	T.Fot
Compósito fibra de vidro com epóxi e PET	Ondulada larga	REF.T.F.V.PET

Fonte: Autor

4.3.2 Conceção selecionada

O conceito da telha formada por um compósito laminado com fibras de vidro, de matriz polimérica (PET reciclado não processado) fixada com resina epóxi com proteção UV se apresentou uma solução tecnicamente viável. O conceito inicial surgiu a partir do trabalho apresentado por Zancanella *et al* (2017) e foi aprimorado durante o desenvolvimento deste trabalho. A princípio, pensou-se em fabricar a telha a partir de um processo de laminação simples, formando uma geometria ondulada, assim como das telhas de fibrocimento. A matriz de Pugh representada na Tabela 7, a seguir, compara os diferentes conceitos analisados, bem como seus resultados.

Tabela 7 - Triagem de concepções adotando a matriz de Pugh

Nº	Critérios generalizados adotados	Concepção alternativas geradas														
		REF. T.F.V.PET	T.Cer	T.Pol	T.PET	T.Vid	T.Con	T.Esm	T.F.Vid	T.Fib	T.F.Veg	T.PVC	T.Met	T.Gra	T.T.Acu	T.Fot
1	Isolamento térmico	0	+	+	-	-	+	+	0	-	0	-	-	+	+	+
2	Boa aparência	0	+	0	0	+	+	+	0	0	+	0	0	+	0	+
3	Boa resistência	0	-	0	0	-	-	-	0	-	-	-	+	+	+	-
4	Durabilidade	0	-	0	0	-	-	-	0	-	-	0	0	0	0	-
5	É ecológica	0	-	-	0	-	-	-	0	-	+	0	-	-	-	-
6	Fácil armazenagem	0	-	-	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	-
7	Fácil manutenção	0	-	-	0	-	-	0	0	-	0	0	0	-	0	-
8	Fácil transporte	0	-	-	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	-
9	Mercado	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
10	Método construtivo	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	0	-	0	+
11	Possibilita economia de energia	0	-	0	0	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-	+
12	Proteção UV	0	+	0	-	-	+	+	-	-	0	0	-	+	0	+
13	Reciclagem econômica	0	-	0	+	-	-	-	0	0	+	-	-	-	-	-
14	Rendimento	0	-	-	-	-	-	-	0	+	-	+	+	+	+	-
15	Robustez (peso)	0	-	0	0	-	-	-	0	-	0	0	0	-	-	-
	Soma de (+)	0(+)	5(+)	3(+)	3(+)	3(+)	5(+)	5(+)	1(+)	2(+)	4(+)	3(+)	3(+)	6(+)	4(+)	6(+)
	Soma de (-)	0(-)	10(-)	5(-)	3(-)	11(-)	10(-)	9(-)	1(-)	8(-)	4(-)	4(-)	5(-)	6(-)	4(-)	9(-)
	Soma de (0)	15(0)	0(0)	7(0)	9(0)	1(0)	0(0)	1(0)	14(0)	5(0)	7(0)	8(0)	7(0)	3(0)	7(0)	0(0)
	Resultado final (+) + (-)	0(+)	5(-)	2(-)	0(+)	8(-)	5(-)	4(-)	0(+)	6(-)	0(+)	1(-)	2(-)	0(+)	0(+)	3(-)

Fonte: Adaptado de Back *et al* (2008)

De início, é possível perceber que a concepção proposta se aproxima muito das telhas de PET, Fibra de Vidro, Fibra Vegetal, Gravilhada e Termoacústica, todas com o conceito final 0(+). Esse resultado era esperado, visto a composição e características dos materiais que irão compor a telha de PET desenvolvida neste trabalho, já que a concepção proposta une algumas propriedades dos materiais que constituem a telha.

O PET apresenta boa resistência mecânica, baixa absorção de umidade, baixo desgaste e abrasão, boa resistência química e uma boa adesão, enquanto a fibra de vidro oferece um bom isolamento térmico, boa resistência mecânica, resistência a temperaturas elevadas, e a resina epóxi proporciona proteção contra UV e boa adesividade.

Tratando-se da matriz, é importante detalhar cada item, bem como seu preenchimento. Antes de qualquer detalhamento, é preciso entender como a matriz funciona. Basicamente, ela compara as concepções através de critérios previamente definidos pela equipe multidisciplinar do Ifes – Campus São Mateus. A concepção de referência sempre servirá como base para indicar se uma concepção alternativa apresenta melhor desempenho (+), pior desempenho (-) ou um desempenho equiparado (0).

O primeiro item, referente ao isolamento térmico, avalia qual o nível de isolamento apresentado por cada concepção alternativa, haja vista que este critério foi avaliado em função dos materiais que cada item utiliza. Por exemplo, é de notório saber que o concreto e a cerâmica são excelentes isolantes térmicos. Diante disso, nesse critério as concepções que utilizam concreto, cerâmica, granulados rochosos ou materiais caracterizados como bons isolantes térmicos, receberam o conceito (+), pois estes materiais são melhores isolantes que a fibra de vidro (material presente na telha de referência).

Já as telhas de PET, vidro, fibrocimento, PVC e metálicas receberam o conceito (-) neste critério, porque são constituídos de materiais que absorvem o calor com maior facilidade e que, portanto, deixam o ambiente com temperaturas mais elevadas, caso não seja aplicado nenhum tipo de isolante térmico. Os materiais que se assemelham, como as telhas de fibra de vidro e telhas de fibras vegetais receberam o conceito (0) neste critério, visto que possuem características de isolamento térmico bem próximas.

Quanto à aparência, que foi o segundo critério avaliado, salienta-se que é muito relativo, haja vista que cada indivíduo possui gostos e percepções diferentes no tocante a ela. Contudo, tal critério foi discutido, e a percepção geral foi de que as telhas que apresentam o formato colonial ou romana nas tonalidades mais escuras harmonizam melhor com o ambiente, tornando-se aparentemente mais atraentes e visualmente mais agradáveis.

Sendo assim, as telhas que se destacam neste critério são as telhas de cerâmica, concreto, esmaltadas, fibra vegetal, gravilhada e fotovoltaicas. As telhas de vidro também receberam um conceito (+) neste critério, por serem consideradas como objeto decorativo na opinião de alguns arquitetos e design de interiores. Geralmente, são aplicadas junto com outro tipo de telha, e são empregadas para dar luminosidade ao ambiente interno, causando a sensação de iluminação natural.

O critério de resistência foi avaliado em função dos materiais que constituem a telha, sendo que, dentre as concepções selecionadas, as telhas metálicas apresentam maior resistência mecânica, independente se gravilhadas, termoacústicas ou simplesmente metálicas, enquanto as telhas de cerâmica, vidro, concreto, esmaltada, fibrocimento e fotovoltaica são relativamente frágeis, e as telhas de PVC apresentam resistência relativamente inferior e, portanto, foram classificadas com conceito (-). As demais apresentam resistências aproximadas, conforme literatura.

Em relação à durabilidade, foram classificadas em função do tempo de degradação do material se exposto a intempéries climáticas variados. Neste critério, telhas constituídas de materiais poliméricos, fibras e metálicas foram conceituadas como (0), ou seja, receberam o mesmo conceito do material de referência, que é basicamente constituído de polímero e fibra de vidro. Além disso, materiais que apresentam facilidade de quebrar foram interpretados com materiais de baixa durabilidade quanto à sua funcionalidade.

Deste modo, as telhas de cerâmica, vidro, concreto, esmaltada, fibrocimento e fibra vegetal foram classificadas com (-). As telhas fotovoltaicas também receberam a mesma classificação, em virtude de também serem constituídas de material cerâmico.

O requisito ecológico foi classificado levando-se em consideração o nível de agressão ao ambiente, a sustentabilidade e a possibilidade de realizar a

reciclagem dos materiais que constituem as telhas. Sendo assim, as telhas de fibras vegetais são as que apresentam maior critério ecológico, recebendo a classificação (+).

Já em relação aos critérios de armazenamento, transporte e manutenção, estes estão relacionados à facilidade de se realizar o armazenamento, o transporte e a manutenção, respectivamente. No transporte, por exemplo, foi avaliada a questão do peso, ou seja, telhas mais pesadas demoram mais tempo para realizar o carregamento e a descarga, e também necessitam de melhor amarração. Dependendo da geometria, não podem ser transportadas em várias pilhas.

No armazenamento, telhas muito grandes podem necessitar de maior espaço relativo, e telhas muito pequenas podem ser danificadas com maior facilidade. Telhas que apresentam características mais frágeis também tendem a quebrar com maior facilidade e, por isso, exigem maiores cuidados com o armazenamento. Além disso, telhas que acumulam umidade e lodo com facilidade necessitam de condições especiais de armazenamento, de modo que não podem ser armazenadas no tempo. Telhas que recebem algum tratamento superficial devem ser armazenadas e transportadas com maior cuidado.

Na manutenção, telhas que acumulam muito lodo e umidade necessitam de manutenção mais criteriosa e em intervalos menores. Telhas muito grandes podem ser facilmente quebradas se forem mal instaladas. Telhas mais pesadas ocasionam manutenção das estruturas de sustentação com maior frequência.

Em relação ao critério mercado, foi entendido que por não estar inserida no mercado, a telha de referência apresenta a pior colocação possível. Sendo assim, todos os outros conceitos receberam a classificação (+) por já estarem atuantes no mercado há algum tempo e por já serem produzidas em grandes volumes, podendo ser devidamente comercializadas.

O critério de método construtivo envolve uma avaliação da geometria de cada telha em função das suas dimensões. Telhas pequenas e leves necessitam de melhor fixação, enquanto telhas maiores e mais pesadas são mais difíceis de serem carregadas pela força dos ventos. Outra análise está relacionada à quantidade de processos aos quais devem ser submetidas para sua fabricação.

Telhas que receberam o conceito (+) constituem processos com menor número de etapas e necessitam de poucos recursos para serem produzidas em

grande quantidade. As telhas gravilhadas, por exemplo, recebem todo o processo de beneficiamento do metal, conformação e, por fim, devem ser revestidas por uma camada de rocha moída para obter um acabamento cerâmico e, por isso, são muito caras, pelo que foram classificadas com conceito (-).

Telhas que possuem a opção de serem translúcidas receberam o conceito (0) no critério de economia de energia, pois elas possibilitam a utilização da luminosidade do ambiente externo para iluminar o ambiente interno. A única telha que recebeu o conceito (+) neste item foi a telha fotovoltaica, pois é a única, dentre as opções, capaz de produzir energia.

O critério de reciclagem foi avaliado em função da facilidade e do custo de se realizar a reciclagem da telha. Telhas de PET, por exemplo, podem ser recicladas até o quarto ciclo sem perder significativamente suas propriedades. Já as telhas de fibras vegetais podem, após o fim de sua vida útil, ser utilizadas como combustível ou reprocessadas para gerar novos produtos.

O rendimento é um critério que avalia, basicamente, a eficiência após a disposição das telhas por unidade de m², ou seja, telhas que são montadas através do processo de recobrimento necessitam de maior quantidade de telhas para ocupar a mesma área útil. As telhas que são comercializadas em maiores dimensões apresentam um melhor aproveitamento, ou seja, a área que é sobreposta é relativamente pequena em relação à área utilizada para a cobertura.

Por fim, o critério robustez, ou peso. Quanto mais pesada for a telha, mais resistente deverá ser a estrutura de sustentação, e nas mesmas proporções deverão ser os cuidados de armazenamento, manuseio e transporte. Telhas mais pesadas receberam (-) neste item.

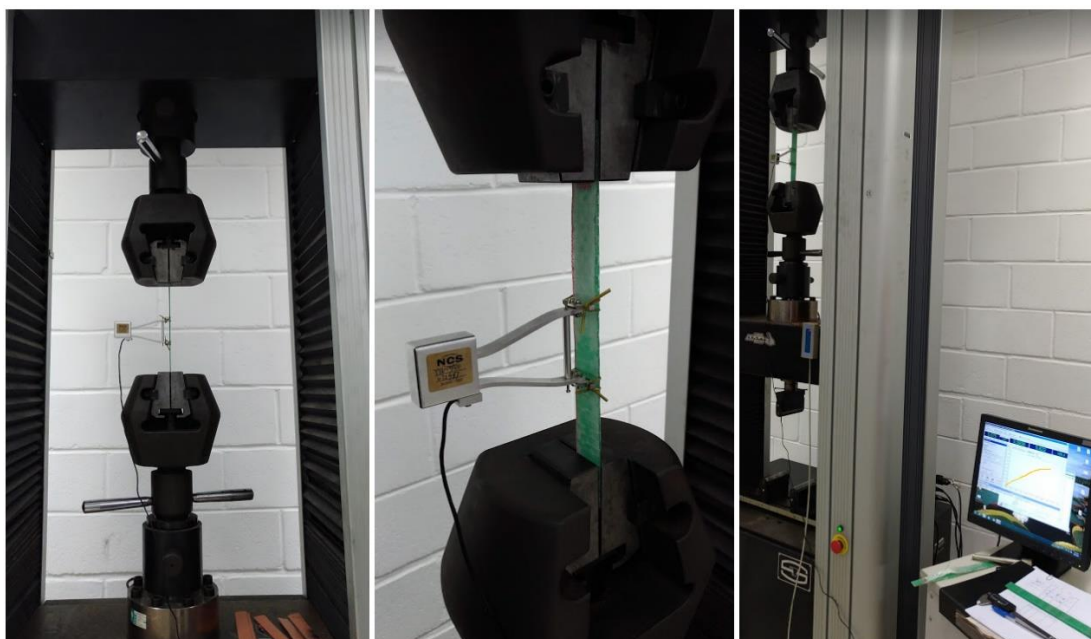
4.3.3 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do compósito foram obtidas através dos ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto. Os ensaios foram de extrema importância para abastecer a matriz de Pugh com informações referentes a características mecânicas encontradas no compósito fabricado. Inicialmente, foram realizados os ensaios nos corpos de prova de tração, seguidos pelo ensaio de flexão e impacto.

4.3.3.1 Resistência à tração

Para determinar a resistência à tração, os corpos de prova foram posicionados na máquina universal de ensaio. O extensômetro foi utilizado para que fosse possível a leitura real do módulo de elasticidade do compósito. A Figura 55 representa a execução do ensaio de tração sendo realizado.

Figura 55 - Execução do ensaio de tração



Fonte: Autor

A Figura 56 mostra o macroaspecto dos corpos de prova após o ensaio de tração. Foi realizado o ensaio de tração em cinco corpos de provas, todos contendo a matriz de PET tramada com tiras de aproximadamente 5mm, reforçados com fibra de vidro em malha e resina epóxi com proteção UV.

Figura 56 - Macro aspecto dos corpos de prova de tração após o ensaio realizado



Fonte: Autor

Os ensaios de tração foram realizados até a ruptura, ocorrendo separação por cisalhamento das matrizes poliméricas de PET e epóxi das fibras de vidro. O cisalhamento ocorre devido às diferentes deformações em tração, que acontecem em decorrência da diferença de rigidez dos materiais. Inclusive, no corpo de prova 4 houve total desprendimento da matriz e o reforço.

Todos os corpos de prova, após atingirem a tensão máxima, iniciaram o processo de fratura por cisalhamento da resina epóxi e o rompimento das fibras de vidro. Como o núcleo composto por tramas de PET é mais dúctil, ao ocorrer o cisalhamento da resina epóxi a matriz continuou deformando-se.

A Tabela 8 mostra os módulos de elasticidades obtidos em cada corpo de prova, bem como a média, variância e desvio padrão.

Tabela 8 - Módulos de elasticidade encontrados para os corpos de prova de tração

	Módulo de elasticidade	
	MPa	GPa
F1#5	6548,19	6,55
F2#5	6802,21	6,80
F3#5	6052,86	6,05
F4#5	5909,75	5,91
F5#5	6742,58	6,74
Média	6411,1	6,41
Desvio padrão	363,7	0,36

Fonte: Autor

O valor médio do módulo de elasticidade obtido foi de 6,41GPa. Para efeitos comparativos, Callister e Rethwisch (2013) indicam os módulos de

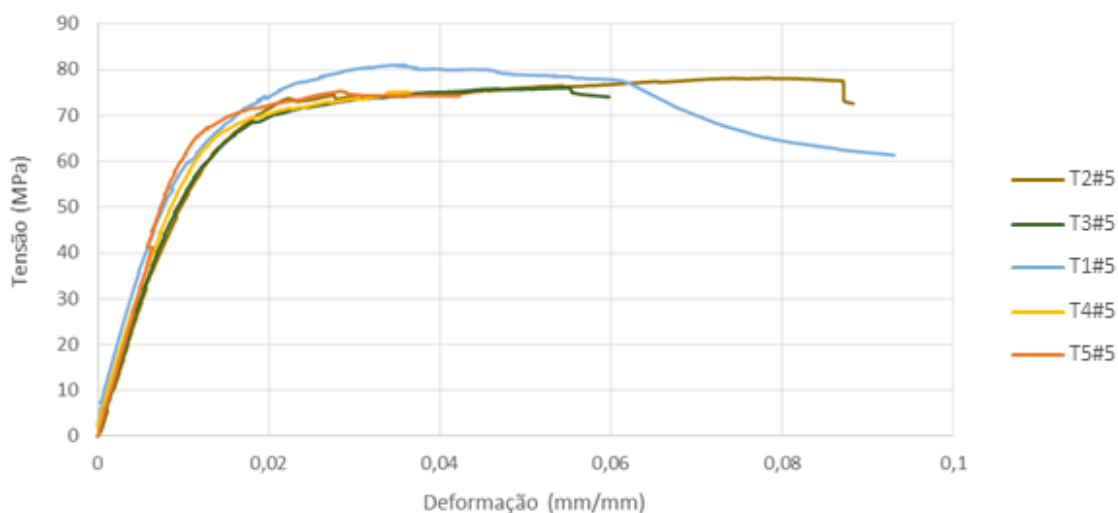
elasticidade do PET puro como sendo 2,76 a 4,14GPa, enquanto o epóxi apresenta um módulo de 2,41GPa e, ainda, a fibra de vidro com matriz epóxi com 45GPa (longitudinal) e 12GPa (transversal).

Já Zancanella *et al* (2017) encontraram o módulo de elasticidade de 3,24GPa para um compósito muito parecido, mudando apenas o tipo de resina. Segundo os autores, esperava-se um resultado superior, contudo, devido a fatores de fabricação isso não foi possível. Para os autores, se o processo de fabricação fosse aprimorado, seria possível obter um melhor resultado.

Diante de tais resultados, percebe-se que ao aprimorar o método de fabricação do compósito desenvolvido por Zancanella *et al* (2017), foi possível, de fato, obter resultados significativamente superiores, levando a acreditar que um processo de fabricação mais tecnológico, como, por exemplo, uma laminação a vácuo, influenciaria ainda mais nos resultados.

O Gráfico 2 mostra a sobreposição das curvas geradas no ensaio de tração, sendo que se observou que o corpo de prova 1 (T1#5) foi o que apresentou a maior resistência à tração, de aproximadamente 80,00MPa, enquanto os corpos de prova T2#5, T3#5, T4#5 e T5#5 apresentaram tensões máximas de 74,20MPa, 72,44MPa, 73,26MPa e 75,32MPa, respectivamente, ocasionando, portanto, uma resistência à tração média de $75,04 \pm 2,97$ MPa. O Apêndice A apresenta gráficos de tração de cada corpo de prova com maiores detalhes.

Gráfico 2 - Resultados dos ensaios de tração nos corpos de prova do material compósito



Fonte: Autor

Se comparada aos resultados de Zancanella *et al* (2017), a resistência à tração média dos compósitos chega a ser 2,5 vezes maior. Isso ocorreu devido à formação de bolhas internas durante a laminação, defeito comum em compósitos laminados. Outro fator que pode ter influenciado é o tipo de resina utilizada. Zancanella *et al* (2017) utilizaram resina de Poliéster que, para Callister e Rethwisch (2013), possui um limite de resistência à tração entre 41,40 a 89,7MPa, enquanto o epóxi varia entre 27,60 a 90,00MPa.

Contudo, também seria aceitável dizer que o tipo de resina não influenciou nos resultados, uma vez que tanto a resina poliéster quanto a epóxi podem admitir a mesma resistência à tração. Para afirmar, de fato, se a resina influenciou nos resultados ou não, seria necessário que os valores de resistência à tração fossem medidos e que os processos de fabricação do compósito fossem idênticos.

A interpretação mais aceitável para os diferentes resultados encontrados está, de fato, na qualidade do processo de laminação, na fabricação da matriz de PET e na pressão exercida na conformação. Estes três pontos são fundamentais para agregar a resina entre os poros da matriz de PET, assim como nos poros da malha de fibra de vidro.

Outro fator que pode ter sido responsável pelo melhor resultado é a qualidade do PET utilizado para fabricação da matriz, uma vez que algumas garrafas de refrigerante apresentam maior resistência. Como foram utilizadas garrafas maiores, de 3,3L, possivelmente elas apresentem maior resistência mecânica, por terem de armazenar maior quantidade de refrigerante e gás.

Além disso, a utilização de aquecedor térmico durante a laminação reduziu significativamente a formação de bolhas de ar e, conseqüentemente, melhorou a agregação da resina à matriz, ocasionando melhores resultados de resistência à tração.

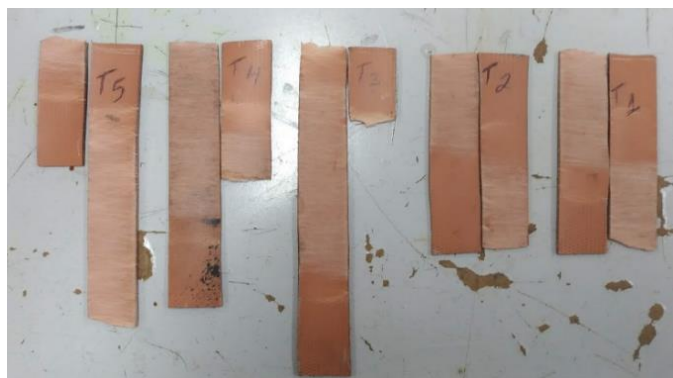
Segundo Callister e Rethwisch (2013), as configurações das fibras de reforço de um compósito laminado irão influenciar em sua resistência final. O fato de ter sido utilizada uma manta de fibra de vidro certamente contribuiu para que houvesse melhora na resistência à tração do compósito em questão.

Para efeitos de parâmetros de projeto, ensaios mecânicos de tração foram realizados em telhas comerciais de PVC, sendo que as amostras foram cortadas seguindo as mesmas dimensões e adotados os mesmos

procedimentos operacionais utilizados nos testes dos corpos de prova dos compósitos laminados. A maior relevância deste ensaio foi poder comparar os resultados encontrados para o compósito com os resultados de uma telha já comercializada que, literalmente, deveria apresentar resistência à tração entre 40,70 a 51,70MPa.

A Figura 57 apresenta os corpos de prova derivados da telha comercial e PVC submetidos ao ensaio de tração.

Figura 57 - Corpos de prova de PVC após ensaio de tração

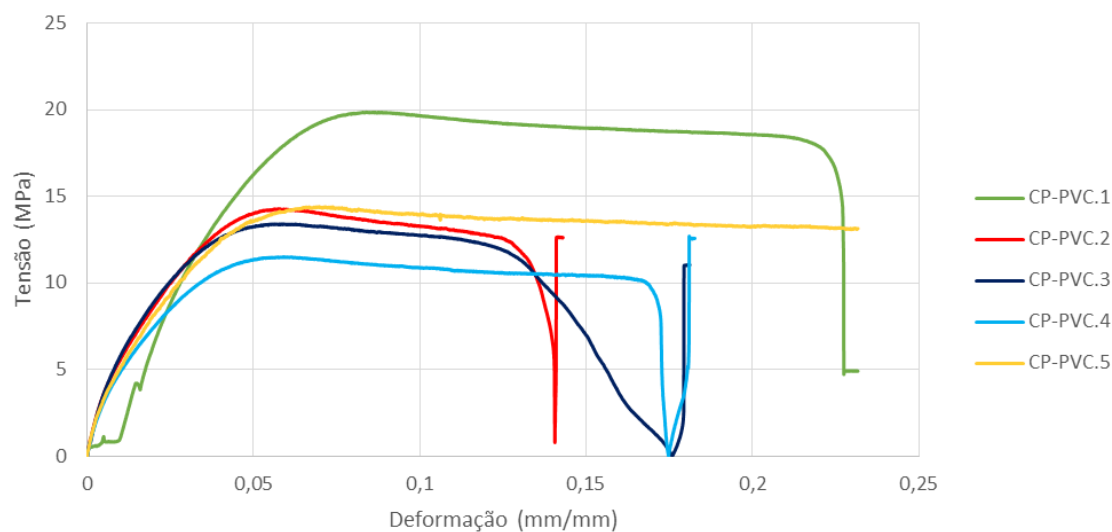


Fonte: Autor

Na imagem é possível verificar que, diferentemente dos corpos de prova constituídos pelo compósito de PET, fibra de vidro e epóxi, as amostras de PVC foram totalmente separadas ao meio. Isso ocorre porque o material constituinte da telha de PVC comercial é basicamente constituído de um único material, ocorrendo deformações em tração praticamente uniformes, enquanto no compósito existe diferenças entre as rigidezes de cada material, fazendo com que deformem de maneira diferente.

O Gráfico 3, a seguir, esboça os resultados encontrados para os corpos de prova de PVC submetidos ao ensaio de tração. A resistência à tração média dos corpos de prova da telha de PVC foi de $14,93 \pm 2,85$ MPa, valor bem abaixo do que informado pela literatura. A Plastibrinq (2018), uma das fabricantes de telhas de PVC no Brasil, afirma que cerca de 8% do material da telha de PVC é composta por um revestimento de acrílico, o que pode ter alterado a resistência do material.

Gráfico 3 - Resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova da telha de PVC



Fonte: Autor

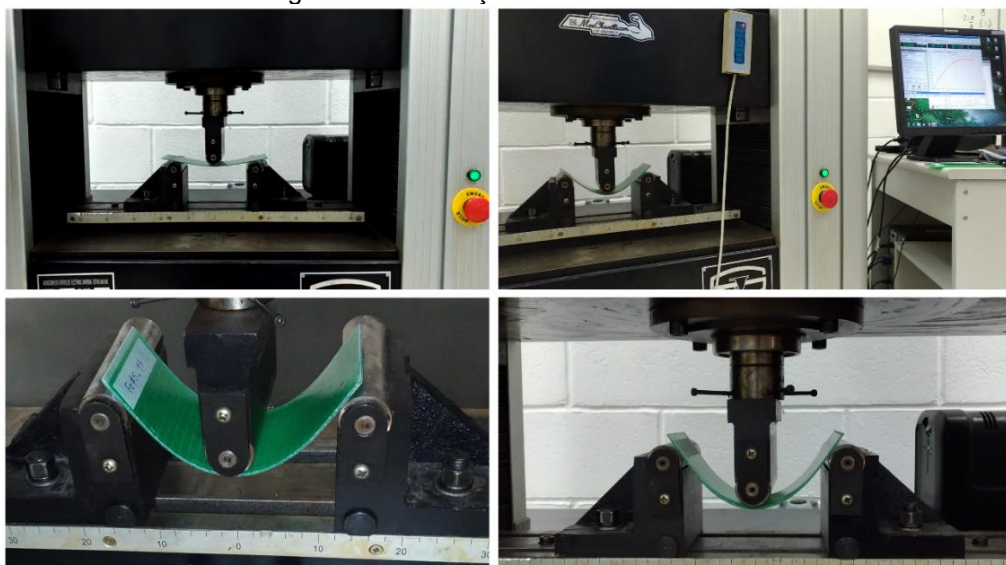
Os resultados encontrados para resistência da telha de PVC comercial mostram que, apesar do seu material constituinte ser majoritariamente composta de PVC, não garante que sua resistência é a mesma especificada na literatura. Muitos fatores podem ter influenciado estes resultados, como por exemplo, os processos de fabricação, a utilização ou não de material reciclado para fabricação da telha de PVC, a temperatura de conformação durante a fabricação, entre outros.

Em relação ao compósito fabricado, sua resistência à tração chega a ser 5 (cinco) vezes maior que a do material da telha de PVC, considerada de boa resistência comercial. Diante dos resultados, fica claro o grande potencial de aplicação deste compósito desenvolvido a partir do reaproveitamento de garrafas PET para fabricação da matriz, sendo reforçada com manta de fibra de vidro e resina epóxi.

4.3.3.2 Resistência à flexão

As resistências à flexão foram obtidas através dos ensaios de flexão de 3 pontos. Referida resistência se trata de propriedade de grande relevância para a aplicação do compósito, pois permite verificar a tensão axial máxima e a tensão de cisalhamento do material através da força máxima que é aplicada no material, provocando um deslocamento de flexão até sua ruptura. A Figura 58 mostra o ensaio sendo realizado, sendo que durante o deslocamento da travessa, o corpo de prova sofre flexão.

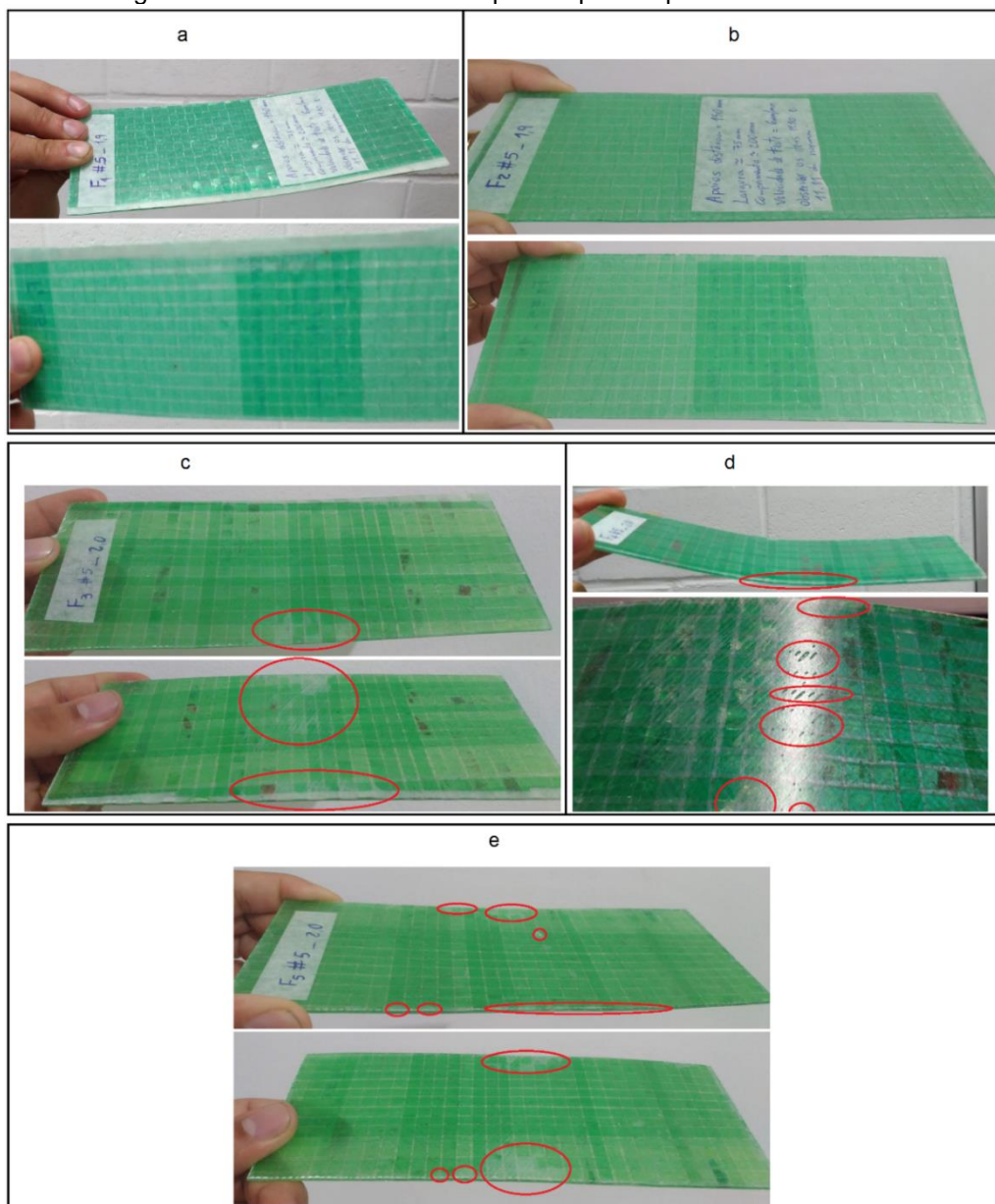
Figura 58 - Execução do ensaio de flexão



Fonte: Autor

O comportamento do compósito submetido ao ensaio de flexão superou as expectativas. A carga foi aplicada durante 6 (seis) minutos, como solicitado pela norma utilizada. Durante o ensaio, o material apresentou um comportamento dúctil sem a presença de fratura aparente ou mínimos pontos. Após o período do ensaio, a carga foi aliviada para identificar possíveis sinais de fratura nos corpos de prova. A Figura 59 ilustra a inspeção visual nos corpos de prova.

Figura 59 - Ensaio visual dos corpos de prova após ensaio de flexão



Fonte: Autor

Tanto o corpo de prova F1#5 (Figura 59a) quanto o F2#5 (Figura 59b) não sofreram fraturas aparentes. Também não foi identificada a presença de poros superficiais após os ensaios. Estas duas amostras foram as que apresentaram maiores tensões axiais de flexão e tensão de cisalhamento – Tabela 9, enquanto as amostras F3#5, F4#5 e F5#5, Figura 59c, 9d e 9e, respectivamente, apresentaram separação da fibra de vidro nas bordas.

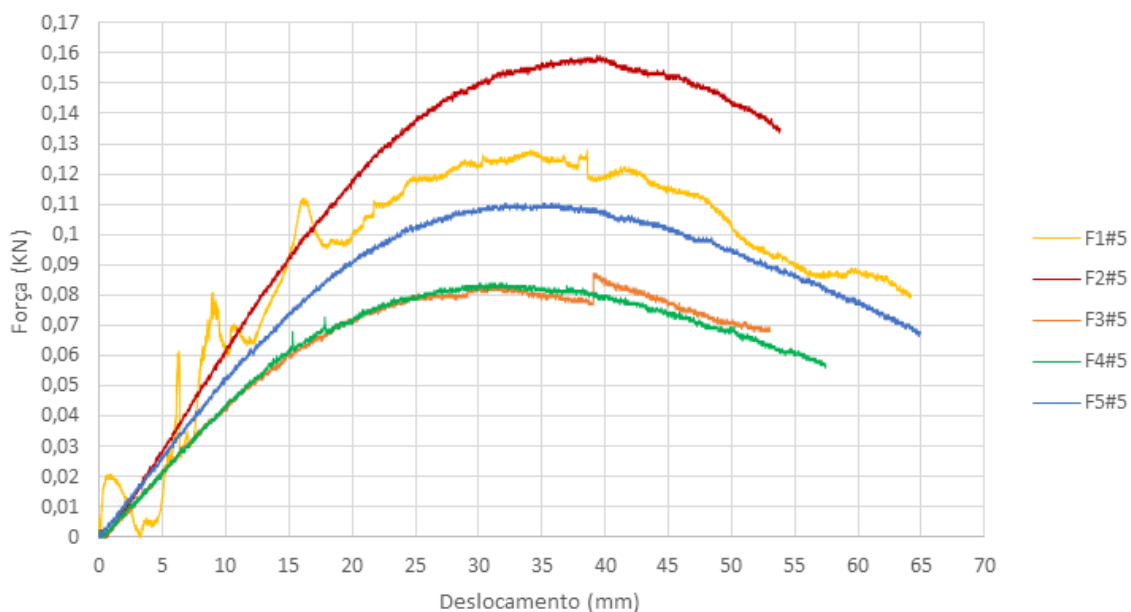
O corpo de prova F4#5 foi o que apresentou maior quantidade de poros superficiais após o ensaio. Estes poros foram formados na superfície oposta à região de aplicação da carga, justamente pelo esforço de tração localizado na outra face. Certamente havia presença de pequenas bolhas internas e, quando

submetido aos esforços, ocorreu o deslocamento das fibras e a explosão das bolhas de ar, caracterizando a formação destes poros.

Estas pequenas falhas superficiais eram esperadas, já que o processo foi artesanal, não sendo possível realizar a restrição total de formação de bolhas internas. Um processo de laminação a vácuo reduziria significativamente a formação destas bolhas internas e, conseqüentemente, eliminaria a aparição pequenas imperfeições superficiais.

O Gráfico 4 mostra a sobreposição das curvas geradas no ensaio de flexão, sendo que observou-se que o corpo de prova 2 (F2#5) foi o que apresentou a maior força máxima, de aproximadamente 0,16KN, enquanto os corpos de prova F1#5, F3#5, F4#5 e F5#5 apresentaram forças máximas de 0,13KN, 0,08KN, 0,08KN e 0,11KN, respectivamente, ocasionando, portanto, uma força máxima média de $0,11 \pm 0,03$ KN. O Apêndice B expressa as curvas de flexão para cada corpo de prova com maiores detalhes.

Gráfico 4 - Resultados dos ensaios de flexão nos corpos de prova do material compósito



Fonte: Autor

O corpo de prova F1#5 foi o que apresentou uma curva com maiores formações de picos. Estes picos são sinais de pequenas fraturas por cisalhamento das fibras de vidro ou da resina epóxi, contudo, não afetam a interpretação dos resultados e nem invalidam o corpo de prova.

Os dados obtidos durante os ensaios foram compilados e explorados no Excel para calcular as tensões axiais e tensões de cisalhamento dos corpos de

prova. A Tabela 9 representa os resultados encontrados e a média destas tensões.

Tabela 9 - Tensões axiais e de cisalhamento calculadas para os corpos de prova submetidos a flexão

	$F_{\text{máx}}$ (KN)	σ_{axial} (MPa)	τ (MPa)
F1#5	0,13	110,92	0,67
F2#5	0,16	137,78	0,83
F3#5	0,08	61,52	0,41
F4#5	0,08	62,61	0,42
F5#5	0,11	81,37	0,54
Média	$0,11 \pm 0,03$	$91,28 \pm 32,51$	$0,58 \pm 0,17$

Fonte: Autor

Os corpos de prova F2#5 e F1#5 foram os que apresentaram as maiores resistências à flexão, enquanto as amostras F3#5 e F4#5 apresentaram resultados inferiores. Isso se deve ao fato de que os corpos de prova 1 e 2 foram fabricados a partir de laminados de melhor qualidade, ou seja, com menores quantidades de bolhas de ar por cm^2 .

Comparando estes resultados com os que foram apresentados por Holguín (2015), é possível verificar que o compósito formado nos corpos de prova 1 e 2 apresentaram aumento de aproximadamente 31% na resistência à flexão, se comparados ao polímero PET puro. Contudo, devido à formação de bolhas no processo de laminação do compósito dos corpos de prova 3 e 4, principalmente, a média das tensões axiais foi cerca de 4% menor que a resistência à flexão do PET puro.

Os resultados apresentados por Holguín (2015) indicam que, quando submetido aos processos de reciclagem, o PET sofre alteração da resistência à flexão, caindo cerca de 13%. Sendo assim, mesmo que o compósito estudado fosse fabricado a partir de PET reciclado, não o inviabilizaria tecnicamente para fabricação da telha.

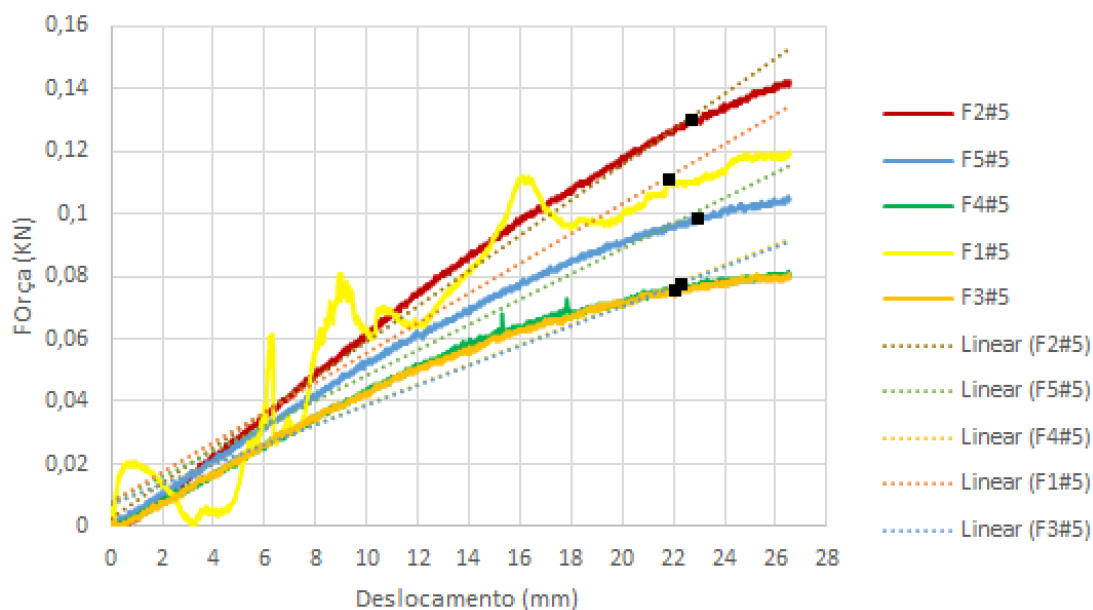
Contudo, é preciso ser criterioso no processo de laminação, visto que existe uma grande influência em relação à resistência à flexão. A diferença dos corpos de prova 1 e 2 para os corpos de prova 3 e 4 chega a ser 123% superior por consequência do processo de laminação. Apesar desta grande diferença, os

resultados encontrados para os corpos de prova F3#5 e F4#5 ainda são satisfatórios para a aplicação em questão.

As análises realizadas até aqui consideram os valores das forças máximas aplicadas a cada corpo de prova durante o ensaio, porém, se tratando de projeto de produto, deve-se levar em consideração a força máxima aplicada até o limite elástico do material, ou seja, região onde não ocorre deformação plástica. Fazer esta análise em matérias compósitas pode ser complexo por não se deformar uniformemente, já que elas podem apresentar fases de deformação diferentes para cada material empregado.

Entretanto, foi realizada uma análise por aproximação, buscando identificar a fase elástica do comportamento de cada corpo de prova durante o esforço de flexão. O Gráfico 5 esboça os resultados para as deformações elásticas, sendo traçada uma linha de tendência nas curvas e identificado o ponto onde a curva apresenta uma grande divergência de direção.

Gráfico 5 - Resultados dos ensaios de flexão até o limite elástico dos corpos de prova do material compósito



Fonte: Autor

Tecnicamente, não é possível afirmar que o material compósito desenvolvido apresenta um comportamento 100% elástico até os pontos marcados no gráfico. Isso porque, durante toda a curva, o material pode sofrer pequenas fraturas, vindo a modificar a direção da curva. O corpo de prova F1#5, por exemplo, já apresenta deformação plástica em 0,02kN, mas a tendência de

maior deformação plástica ocorre a partir de 0,11KN, momento em que a curva se dispersa.

Mas, seguramente, os pontos identificados caracterizam a região de menor deformação plástica, ou seja, o limite elástico. Considerando que o material apresentou um comportamento dúctil, é possível considerar a força máxima como critério de resistência à flexão deste compósito, porém, foi considerado um critério mais conservador, adotando a força máxima aplicada no limite elástico como critério de resistência à flexão. A Tabela 10 expressa os maiores valores das tensões axiais e de cisalhamento calculadas na região de resiliência.

Tabela 10 - Tensões axiais e de cisalhamento máximas calculadas para os corpos de prova submetidos a flexão até a região de resiliência

	$F_{\text{máx}}$ (KN)	σ_{axial} (MPa)	τ (MPa)
F1#5	0,110	95,322	0,574
F2#5	0,130	112,653	0,678
F3#5	0,075	54,924	0,366
F4#5	0,075	55,900	0,373
F5#5	0,095	70,276	0,469
Média	$0,097 \pm 0,024$	$77,815 \pm 25,403$	$0,492 \pm 0,134$

Fonte: Autor

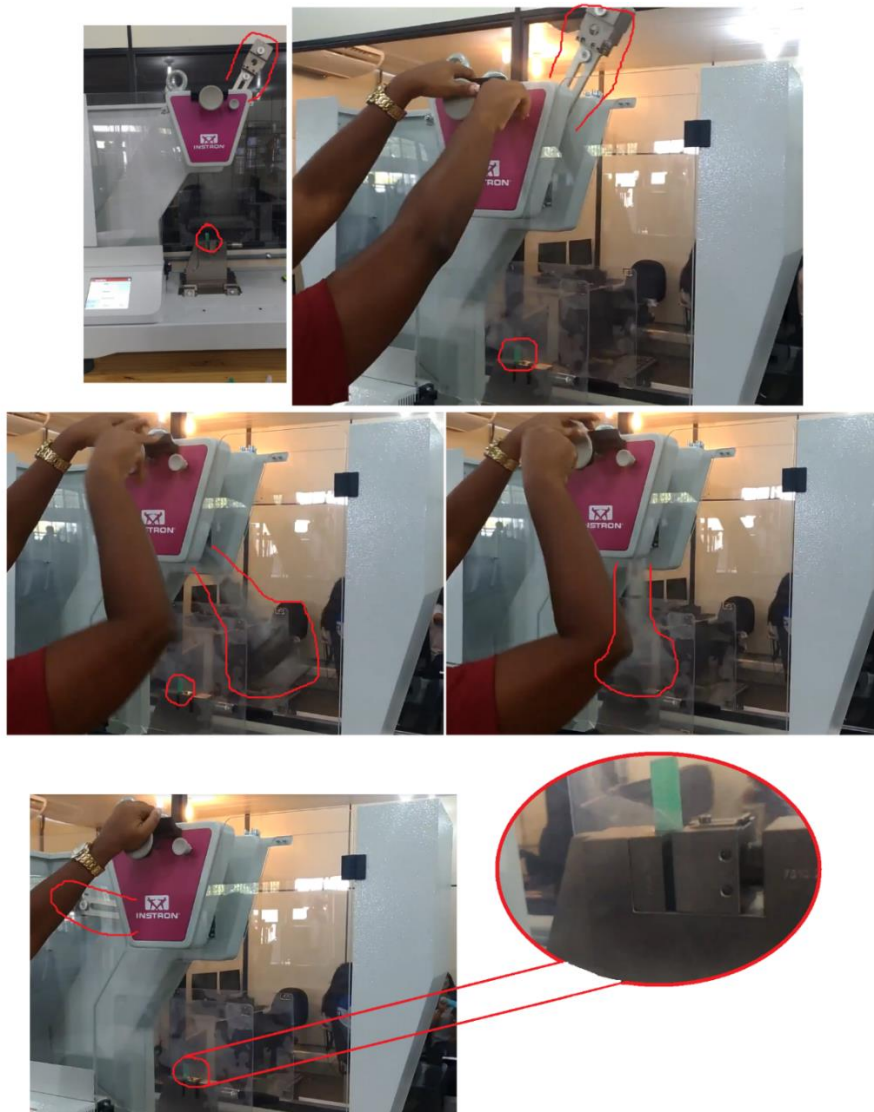
Estatisticamente, as maiores tensões axiais e de cisalhamento no limite elástico são, em média, 14% menores que as tensões axiais e de cisalhamento máximas. Portanto, a tensão axial máxima adotada será de $77,815 \pm 25,403$ MPa, e a tensão de cisalhamento máxima de $0,492 \pm 0,134$ MPa.

4.3.3.3 Resistência ao impacto

A resistência ao impacto é fundamental para verificar a resistência mecânica do compósito em condições mais severas. Pensando em uma situação provável, deve-se imaginar que alguém arremesse uma pedra em cima do telhado que utiliza a telha composta pelo material compósito dos corpos de prova e, a partir daí, questionar-se qual será o comportamento do material da telha: irá fraturar, amassar ou nada vai acontecer? Através dos resultados encontrados no ensaio de impacto é possível prever seu comportamento diante de condições similares a esta.

A resistência ao impacto do compósito foi obtida através do ensaio Izod realizado conforme figura 60. O martelo é liberado da posição de 150° e, ao atingir o corpo de prova preso à base, parte da energia do primeiro é absorvida pelo segundo. Quanto maior for a energia absorvida pelo corpo de prova, mais resistente ao impacto será o material.

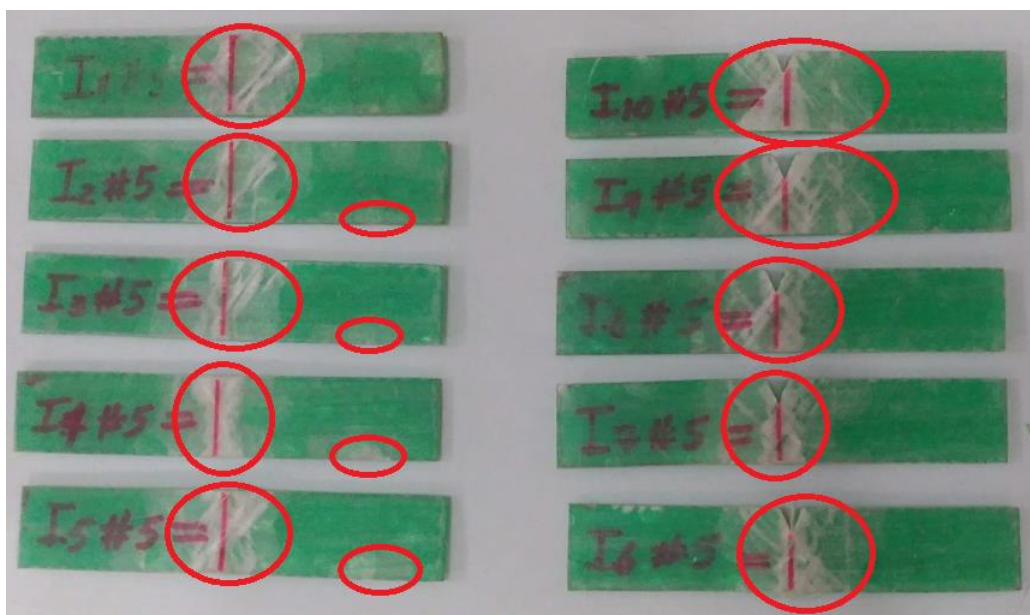
Figura 60 - Execução do ensaio de impacto



Fonte: Autor

Foram ensaiados dez corpos de prova, sendo cinco com entalhe padronizado. Todos os corpos de prova apresentaram fratura, contudo, não ocorreu ruptura do material na seção transversal, ou seja, apesar de ter ocorrido separação da matriz e a fibra de reforço na região transversal, não houve ruptura total. A Figura 61 ilustra a condição dos corpos de prova após a realização dos ensaios de impacto.

Figura 61- Ensaio visual dos corpos de prova após ensaio de impacto Izod



Fonte: Autor

O exame visual nos corpos de prova com entalhe mostra que, mesmo após o impacto, o compósito não se rompeu completamente. Para Maciel (2017), isso ocorre porque as trincas geradas no entalhe iniciam uma propagação transversal pela matriz, que é pouco tenaz e, ao se confrontar com as fibras, que são resistentes, essas trincas mudam sua direção de propagação para o sentido longitudinal, que tendem a acompanhar a interface fibra/matriz com menor resistência.

Esse mecanismo contribui significativamente para aumentar a capacidade de absorção de energia deste compósito, porque quando ocorre a deslaminagem, os inúmeros filamentos derivados do desprendimento superficial das fibras de vidro permanecem unindo as superfícies da trinca. Bucknall e Gilbert (1989) relatam que esse mecanismo de união de fratura de compósitos reforçados com fibras é chamado “bridging”, sendo associado a uma alta tenacidade do compósito em função de uma área de fratura maior, traduzindo em maior energia absorvida no impacto.

Maciel (2017) identificou um comportamento similar em um compósito com matriz epóxidica reforçado com 30% de fibras de curauá. Em contrapartida, identificou que compósitos com matriz epóxidica reforçados com 30% de fibras de vidro apresentaram um comportamento de fratura diferente, ocorrendo a fratura da fibra por consequência de uma melhor aderência da matriz a ela.

Entretanto, o compósito testado por Maciel (2017) utilizou uma matriz de epóxi. Já o compósito desenvolvido neste trabalho se constitui por uma matriz tramada de PET, tornando seu comportamento diferenciado em função do seu mecanismo de união, atribuindo ao compósito boa resistência ao impacto. A Tabela 11 representa os resultados encontrados nos ensaios de impacto Izod para o compósito com matriz de PET tramado reforçado com fibra de vidro e resina epóxi.

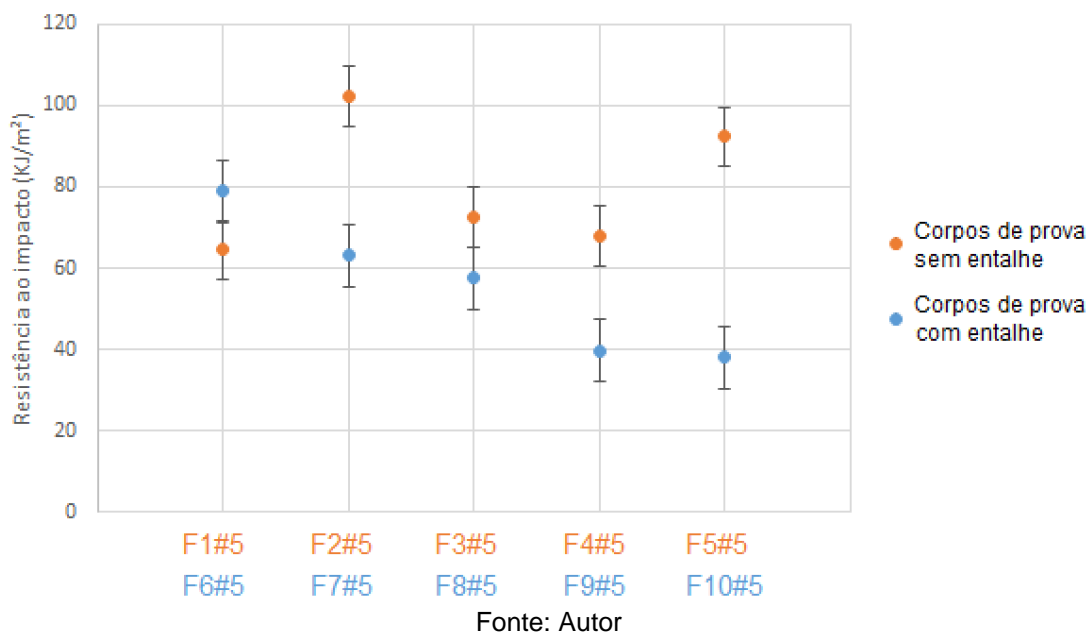
Tabela 11 - Resultados para os ensaios de impacto realizados nos corpos de prova do compósito

		Largura (mm)	Energia Absorvida %	Resistência ao impacto (KJ/m ²)	Energia (J)
Corpos de prova sem entalhe	I1#5	12,5	37,45	64,43	2,06
	I2#5	12,6	59,41	102,23	3,27
	I3#5	12,5	42,19	72,58	2,32
	I4#5	12,7	39,53	68,01	2,18
	I5#5	12,7	53,62	92,25	2,95
	Média	12,6	46,4	79,9	2,6
	Desvio Padrão	0,1	9,6	16,5	0,5
Corpos de prova com entalhe	I6#5	12,5	45,88	78,93	2,53
	I7#5	12,5	36,71	63,16	2,02
	I8#5	12,6	33,46	57,57	1,84
	I9#5	12,7	23,12	39,78	1,27
	I10#5	12,6	22,18	38,15	1,22
	Média	12,6	32,3	55,5	1,8
	Desvio Padrão	0,1	9,9	17,0	0,5
	Média geral	12,6	39,4	67,7	2,2
	Desvio Padrão	0,1	11,8	20,4	0,7

Fonte: Autor

Isolando os valores encontrados relativos às resistências ao impacto dos corpos de prova com entalhe e sem entalhe foi gerado o Gráfico 6, a fim de facilitar a comparação dos resultados. Tecnicamente, os corpos de prova que receberam entalhes apresentam menor resistência ao impacto. Isso significa que o material fragilizado sofreu uma redução de aproximadamente 18% na resistência ao impacto.

Gráfico 6 - Resistência ao impacto dos corpos de prova do material compósito



Respondendo ao questionamento inicial, pode-se afirmar que a telha absorveria cerca de 40% da energia do projétil. Isso significa que o impacto até poderia ocasionar a deslaminção na região afetada, porém, a telha não sofreria fratura severa a ponto de comprometer sua funcionalidade. Telhados que utilizam telhas mais frágeis, como, por exemplo, as de fibrocimento, sofreriam fratura na região de impacto e provavelmente necessitariam ser substituídas.

4.3.4 Propriedades térmicas

Tratando-se do desenvolvimento de um produto que estará frequentemente exposto ao calor, torna-se importante analisar o comportamento do material quando submetido a intempéries de temperatura para verificar se ele resistirá às temperaturas de trabalho.

A análise termogravimétrica (TGA) à qual o compósito foi submetido simula uma condição de degradação térmica agressiva, tornando possível não só a análise das características de degradação térmica do compósito e a sua estabilidade, mas também a determinação dos efeitos da sua história térmica, criando-se uma espécie de identidade, que é única para cada material.

4.3.4.1 Análise termogravimétrica

A degradação térmica e de estabilidade realizadas nas amostras do compósito de PET, resina epóxi e fibra de vidro foram obtidas através da curva TGA e DTGA, permitindo a avaliação do limite de temperatura a que o compósito

poderá ser submetido e se conseguirá suportar a temperatura de trabalho exigida pela telha.

Foram retiradas três amostras de diferentes laminados do compósito, sendo que a identificação será dada por laminado 1 (L1), laminado 2 (L2) e laminado 3 (L3). A Tabela 12 relaciona as massas de cada material utilizado na fabricação dos laminados.

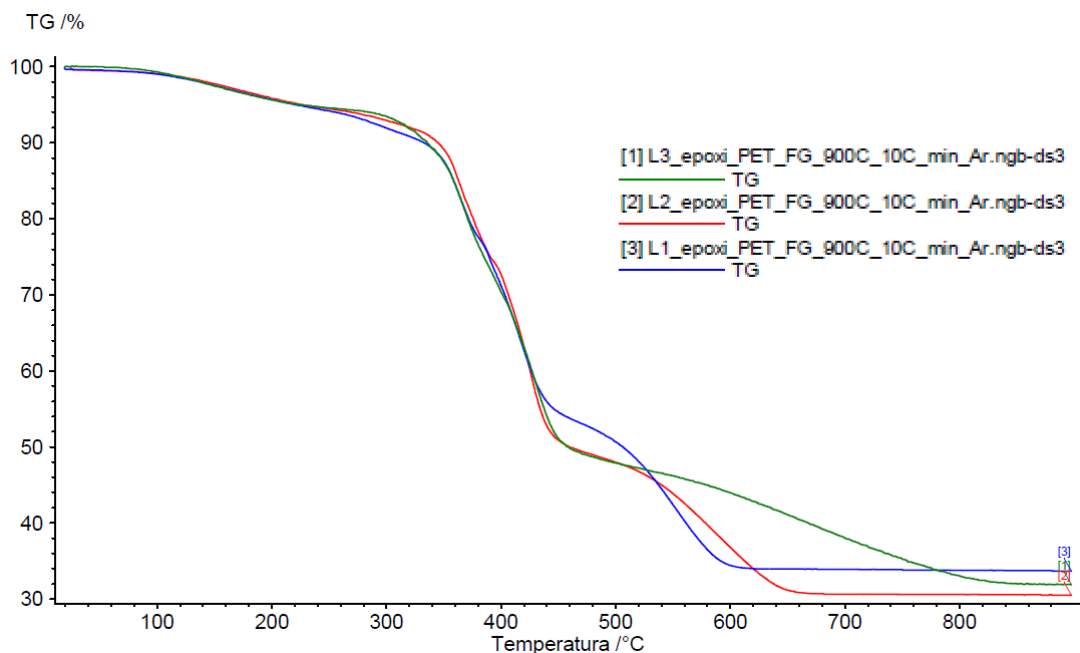
Tabela 12 - Massa relativa aos materiais presentes na laminação dos compósitos

	Matriz (g)	Fibra (g)	Resina (g)	Catalisador (g)	Dimensões da matriz	Corpos de prova
L1	24,676	43,058	46,693	21,011	210x200	F(1-2)#5
L2	32,348	60,892	66,372	29,868	240x240	F(3-5)#5
L3	36,604	60,9	67,252	30,264	240x240	T(1-5)#5 e I(1-10)#5

Fonte: Autor

Em média, os compósitos foram laminados com aproximadamente 18% de PET, 32% de fibra de vidro, 34,5% de resina epóxi e 15,5% de catalisador. O Gráfico 7 mostra as curvas TGA de degradação de cada laminado, as quais estão sobrepostas. Nota-se que existem, basicamente, duas grandes reduções de massa.

Gráfico 7 - Curvas TGA das amostras do compósito com matriz de PET reforçado com fibra de vidro e resina epóxi



As amostras analisadas apresentaram resultados similares, com poucas diferenças na temperatura de degradação e na quantidade de resíduo final. As amostras iniciam a perda de peso próximo à temperatura de 105°C, mas somente em 310°C a perda principal ocorre. A perda parcial de peso entre 105 e 310°C é de aproximadamente 7,5%. A perda principal de peso (60%) ocorre entre 320-700°C, com aproximadamente 32,5% de resíduo final. Este resíduo equivale à massa da fibra de vidro contida no compósito, uma vez que a degradação deste tipo de fibra começa acima de 2000°C.

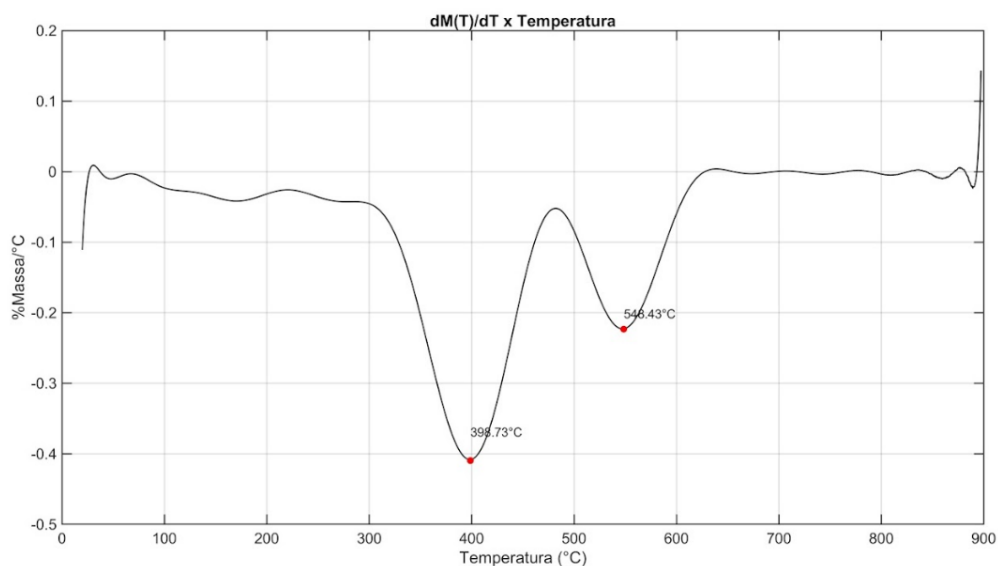
A degradação de 7,5% mostrada no Gráfico 7 é referente às substâncias voláteis e às massas de ar presentes nas bolhas dos laminados, enquanto o maior volume de degradação equivale ao conjunto matriz e resina epóxi. O resíduo final manteve-se praticamente na mesma faixa percentual, o que mostra que, apesar do processo ter sido realizado manualmente, houve uma padronização aceitável do processo de fabricação, atribuindo confiabilidade ao compósito.

Os valores encontrados na curva TGA e DTGA (Apêndice C) dos compósitos laminados apresentam coerência com os resultados apresentados por Holguín (2015), que evidencia a variação de massa do PET a partir de 350 a 510°C com temperatura de pico de degradação equivalente a 423°C, e Wang

et al (2010b) relatam que, em atmosfera oxidante, a resina epóxi pode apresentar três eventos de degradação, nas temperaturas próximas a 350°C, 450°C e 550°C. Tecnicamente, tanto a matriz de PET quanto a resina epóxi do compósito estão sofrendo maior degradação nestas faixas de temperatura.

O Gráfico 8 mostra a curva DTGA do laminado 1, sendo possível observar um pico de degradação do compósito ocorrendo a aproximadamente 400°C e um segundo pico de degradação a aproximadamente 550°C. O primeiro equivale ao pico de degradação da matriz de PET, enquanto o segundo diz respeito ao pico de degradação da resina epóxi.

Gráfico 8 - Curva DTGA das amostras do compósito de PET reforçado com fibra de vidro e resina epóxi



Fonte: Autor

Comparando o resultado de degradação de pico encontrado para o compósito - Gráfico 8, com a degradação de pico do PET - Figura 21, nota-se que apresentam valores muito próximos, portanto, pode-se afirmar que o valor de aproximadamente 400°C encontrado na DTGA do compósito trata-se da degradação do PET constituído na sua matriz.

Na Tabela 13 estão resumidos os dados de temperaturas de degradação para o compósito desenvolvido para fabricação do protótipo da telha.

Tabela 13 - Temperaturas de degradação dos laminados L1, L2 e L3

	Ti (°C)	Tf (°C)	Tp PET (°C)	Tp Resina (°C)
L1	310,73	613,76	398,73	548,43
L2	311,64	661,84	405,09	568,39
L3	278,98	810,63	404,18	662,95

Fonte: Autor

Percebe-se que, de um modo geral, o compósito apresentou boa estabilidade térmica, mas o laminado 3 (L3) é o que apresentou o melhor resultado. Esta diferença certamente está relacionada ao processo de fabricação, pois o laminado 3 foi fabricado por último, mas utilizou a primeira matriz de PET fabricada. A primeira matriz fabricada não ficou com as tiras tão justas, ocasionando maior espaçamento e, por isso, permitindo maior quantidade de resina agregada entre a matriz, possibilitando que a resina se agregasse melhor à matriz e, conseqüentemente, conferindo maior estabilidade térmica ao compósito.

Além disso, por ter sido a terceira laminação, já se tinha maior experiência com o manuseio da resina, bem como seu processo de laminação, acarretando, ao final, uma melhor estabilidade térmica. Contudo, apesar de ter apresentado a melhor estabilidade térmica, sua degradação mais acentuada iniciou-se antes dos 300°C, possivelmente por conter maior quantidade de resina.

Um número maior de amostras possibilitaria uma análise mais detalhada em relação ao comportamento térmico do compósito. Todavia, os resultados apresentados foram satisfatórios para o fim ao qual ele será destinado. Significativamente, não houve histórico de degradação térmica do compósito antes da temperatura de 105°C, portanto, este material pode seguramente ser utilizado na fabricação da telha. Além disso, é importante mencionar que a fibra de vidro, além de contribuir com a estabilidade térmica, é tida como bom isolante térmico e acústico.

4.3.5 Lições aprendidas

A utilização da matriz de Pugh permitiu comparar as vantagens e desvantagens de cada concepção de telha dentro dos critérios selecionados. Com isso, foi possível identificar pontos passíveis de melhoria durante a execução do projeto, como, por exemplo, a forma construtiva da telha, posto que

ficou claro que a telha com geometria mais simples possibilitaria uma vantagem ao projeto, já que este foi considerado complexo por apresentar muitas fases de fabricação.

Ainda sobre o processo de fabricação, na concepção inicial, a conformação da telha passaria por um processo de prensagem na prensa. Posteriormente, através da matriz foi identificado que tal procedimento tornaria o processo de fabricação mais complexo, visto que seria realizado de forma artesanal, ou seja, não havia uma maneira de realizar a prensa mecânica no padrão dimensional que foi pensado inicialmente. Várias possibilidades foram levantadas, contudo, todas se mostraram inviáveis com os recursos disponíveis.

Então, foi preciso alterar a concepção inicial, através da modificação das dimensões da telha. Uma telha de fibrocimento ondulada comercializada possui dimensões de, aproximadamente, 1100mm de largura, com comprimentos variando de 1220 até 3660mm. Já a telha projetada apresenta uma largura próxima a 1100mm e um comprimento próximo a 500mm, sendo que o processo de prensa deveria ser por gravidade, e não um processo mecânico, como pensado inicialmente.

Desde o início, o objetivo do projeto foi apresentar um conceito de telha sustentável capaz de ser produzida de forma artesanal, possibilitando que qualquer pessoa, comunidade ou grupo possa fabricá-la. A alteração dimensional foi um fator relevante durante a escolha da concepção.

Houve certa dúvida em relação ao tipo de fibra de reforço e quanto à direção em que estas fibras seriam expostas na fabricação. Na discussão, a fibra de vidro em manta foi tida como melhor opção, porque ela resiste bem aos esforços unidirecionais, além de ser costurada, o que facilita o processo de laminação, impedindo uma má distribuição das fibras sobre a matriz de PET, garantindo maior uniformidade e reforço.

Pela aplicação do compósito e por ser um dos requisitos avaliados, foi de extrema importância que a resina utilizada apresentasse proteção UV, caso contrário, seria necessário incluir uma alternativa tecnicamente viável substituta para dar ao produto esta característica. Por este motivo, foi selecionada a resina epóxi incolor de alta viscosidade com proteção UV. Esta resina é amplamente empregada para proteção de móveis rústicos, garantindo maior vida útil ao material, além de ser menos agressiva e ter preço acessível.

Após os ensaios, verificou-se que o compósito possui boas propriedades mecânicas, conferindo característica de material dúctil, resistente e com boa absorção ao impacto, além de apresentar boa estabilidade térmica, tornando este material tecnicamente viável para ser utilizado na fabricação da telha.

Sendo assim, o conceito final selecionado foi a fabricação de uma telha de tramas de PET reforçada com fibras de vidro e resina epóxi com proteção UV com 1100mm de largura por 500mm de comprimento. Este conceito mostrou-se, através da matriz de Pugh, ser viável e inclusivo, oferecendo ao produto características diferenciadas. A escolha dimensional possibilitará maior facilidade na montagem do telhado, sem comprometer de maneira significativa o seu rendimento.

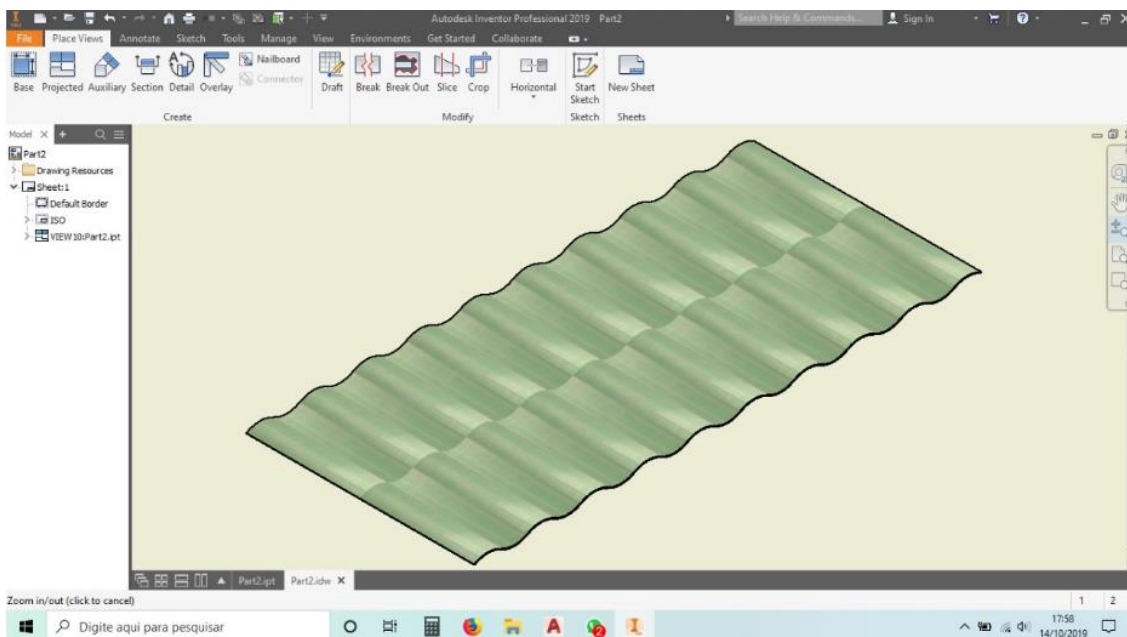
Claro que este conceito não deve se limitar exclusivamente a estas características apresentadas, já que o projeto dimensional, por exemplo, poderá ser alterado caso necessário. Futuramente, se houver a intenção de fabricação em maior escala, tal conceito certamente deverá ser repensado, principalmente os de fabricação, de modo a tornar o processo mais rápido e mais versátil.

4.4 Resultados do projeto preliminar

O projeto preliminar foi executado a partir do projeto conceitual. Foi definido que a telha terá a geometria ondulada, seguindo o mesmo formato do telhão de fibrocimento. Entretanto, por se tratar do primeiro protótipo, suas dimensões foram reduzidas, de modo a facilitar o processo de fabricação. A largura foi mantida em 1100mm, mas houve redução do comprimento para 500mm. A espessura foi reduzida para 2,5mm em função do material utilizado.

A Figura 62 apresenta o projeto 3D executado na plataforma da Autodesk Inventor. Maiores detalhes estão presentes no Apêndice D, onde é possível visualizar as vistas em projeção.

Figura 62 - Projeto 3D da telha



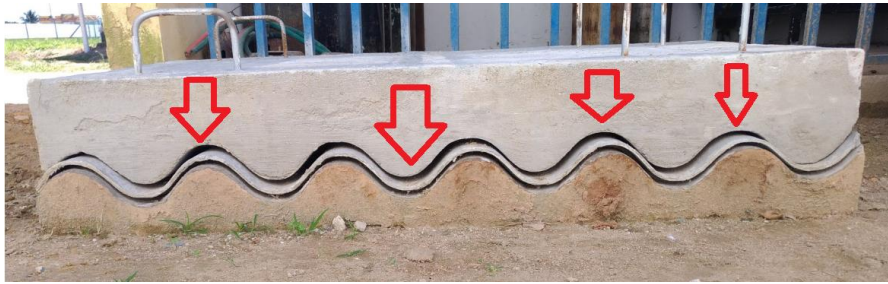
Fonte: Autor

Após definição do projeto 3D, foi iniciado o processo de fabricação, obedecendo ao item 3.1.4.1, descrito no capítulo 3. Algumas dificuldades foram encontradas durante a fabricação, como, por exemplo, a manipulação da resina epóxi nos moldes, já que a superfície não era plana. A resina teve de ser espalhada rapidamente para que não acumulasse no vão inferior.

Paralelo a isso, a matriz teve as tiras coladas, causando maior rigidez na região onde foi aplicada a cola, tornando mais difícil o posicionamento e assentamento da matriz sobre a camada de vidro em cima do molde e a geometria ondulada deste.

Ainda, durante o processo de fabricação da telha perceberam-se alguns erros de fabricação do molde, sendo que o principal foi uma descontinuidade em uma das laterais do molde superior, que ficou mais alto em relação ao molde inferior, impedindo que os dois moldes acoplassem de maneira uniforme – Figura 63.

Figura 63 - Moldes acoplados



Fonte: Autor

Medidas foram tomadas a fim de corrigir as discontinuidades, contudo, não foi possível realizar total correção, de modo que a melhor solução seria fabricar novamente os moldes. A Figura 64 ilustra o resultado final dos moldes utilizados para a fabricação do protótipo. A região identificada foi a que sofreu ajustes, sendo retirada uma quantidade de material excedente, possibilitando realizar a laminação.

Figura 64 - Resultado final dos moldes para laminação do compósito



Fonte: Autor

A laminação foi realizada mesmo sabendo que o molde não se encontrava perfeito. A massa da matriz de PET + fibra de vidro utilizada na fabricação equivale a 1Kg, a mesma proporção de massa da resina epóxi (resina + catalisador = 1Kg). Após 24h, os moldes foram separados e a telha foi retirada. A Figura 65 apresenta o resultado obtido na fabricação da primeira telha com o compósito de PET tramado reforçado com fibra de vidro e resina epóxi.

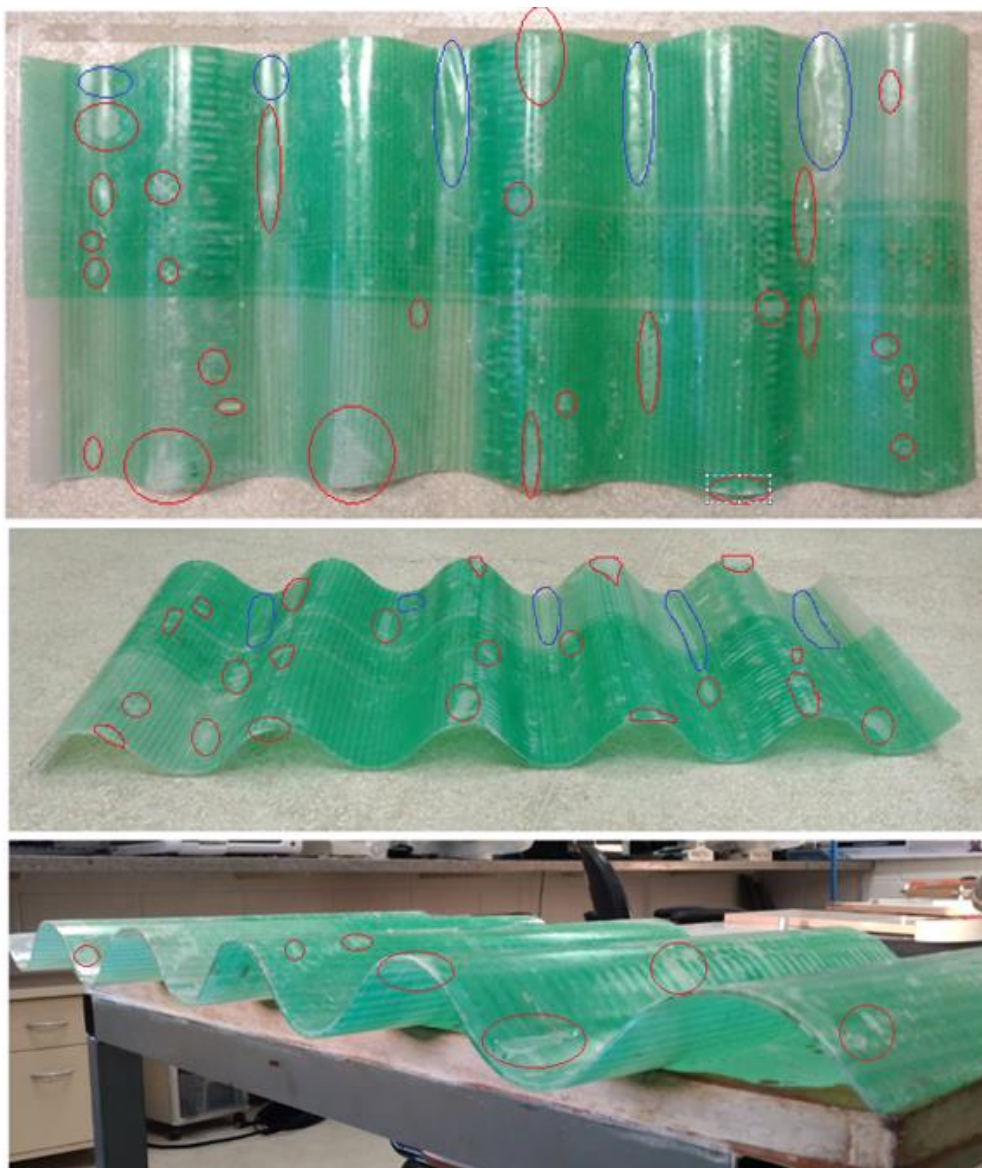
Figura 65 - Protótipo da telha



Fonte: Autor

Aparentemente, o resultado ficou satisfatório, mas na inspeção visual foi possível identificar a presença da formação de muitas bolhas internas. Também foi identificada a falta de preenchimento da resina em alguns pontos, enquanto outra região apresentou excesso da substância. Na Figura 66 é possível visualizar o resultado da inspeção visual. As regiões demarcadas com círculos vermelhos representam a presença de bolhas, má laminação e falta de resina, enquanto as regiões demarcadas com círculos azuis mostram o excesso de resina.

Figura 66 - Inspeção visual do protótipo



Fonte: Autor

Apesar das discontinuidades encontradas no protótipo, ele apresentou resultado muito satisfatório. Boa rigidez, boa estabilidade mecânica, geometria compatível com o modelo ondulado e boa translucidez. O protótipo final ficou com aproximadamente 2Kg, 2,5 vezes mais leve se comparado proporcionalmente à telha ondulada de fibrocimento.

Foram realizados testes de simulação de chuva, os quais foram executados utilizando uma angulação de queda de 5, 10 e 15°. O protótipo não apresentou vazamentos e não absorveu a água. Outro teste realizado foi o de exposição ao tempo na região de São Mateus – ES, com variações de temperatura entre 18 e 34°C, sendo que a telha ficou 10 dias exposta. Não foram

identificadas modificações de coloração, trincas, amolecimento e deslaminação durante este período.

Testes de carga foram realizados à temperatura ambiente (30°C) para verificar o comportamento da telha. Primeiramente, foram simuladas condições estáticas com uma carga de aproximadamente 0,76KN e 1,00KN. Em ambas as condições, o protótipo resistiu sem apresentar danos visuais, sendo que a Figura 67 mostra os primeiros testes de carga sendo realizados.

Figura 67 - Teste de carga estática sendo realizada no protótipo



Fonte: Autor

Em seguida, foram simulados testes em condição estática com a telha apoiada em dois lados, conforme ilustra a Figura 68. O teste foi realizado com as cargas de 0,76KN e 1,13KN. Em ambas, as condições do protótipo se demonstraram estável, não apresentando sinais de fratura. Foi possível verificar a deformação elástica por flexão no sentido longitudinal aos apoios.

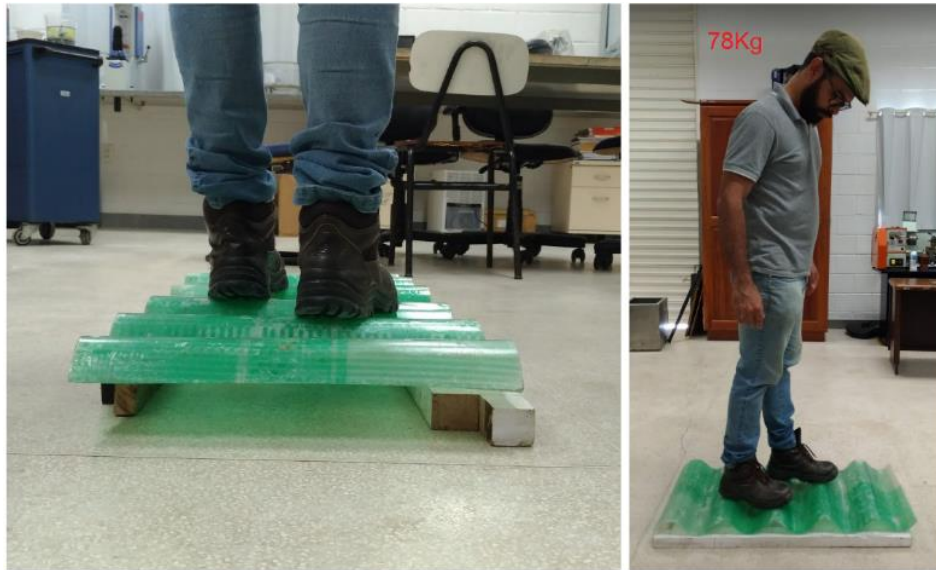
Figura 68 - Teste de carga estática com apoios sendo realizada no protótipo



Fonte: Autor

Por apresentar boa resistência, foi realizado o teste de carga sem a área de apoio, com a intenção de reduzir a área de contato e, conseqüentemente, as tensões exercidas sobre a telha. A Figura 69 demonstra o momento em que o teste está sendo realizado. Durante o teste verificaram-se pequenos estalos na região de contato, porém, o protótipo manteve-se estável.

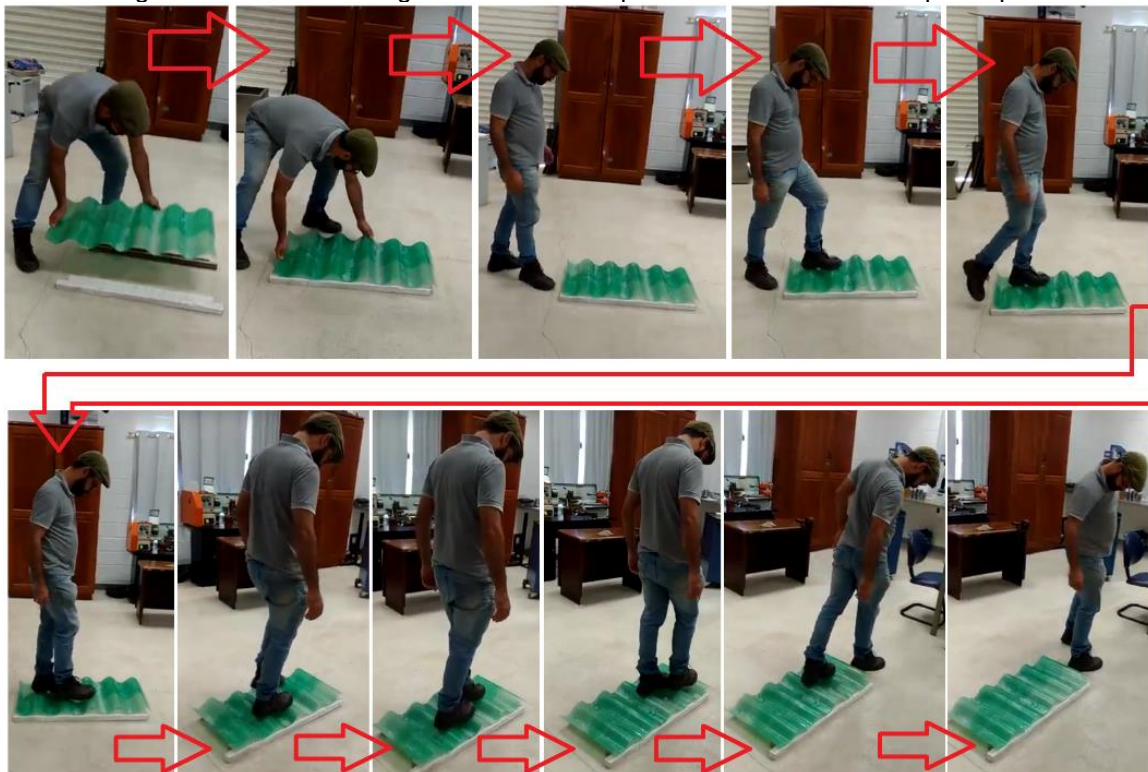
Figura 69 - Teste de carga estática com apoios e redução de área de contato sendo realizada no protótipo



Fonte: Autor

Por último, foi realizado um teste com carga dinâmica, no qual a carga se deslocou sobre a telha, passando por todo seu comprimento. Esse último teste simula a condição de movimento de uma pessoa andando em cima do telhado. A carga de teste foi de 0,76KN. A Figura 70 mostra o teste sendo realizado.

Figura 70 - Teste de carga dinâmica com apoios sendo realizada no protótipo



Fonte: Autor

Durante a transição ouviram-se alguns estalos, certamente devido ao cisalhamento de algumas fibras de vidro ou da resina epóxi. Apesar das pequenas fraturas, não houve rompimento nem separação entre a matriz de PET e as camadas de fibra de vidro. Por não ter sido fixada aos apoios, a telha deslocou-se da sua posição inicial, provocando esforços de torção. A estrutura mostrou-se estável.

Após o teste dinâmico, foi realizado exame visual, verificando-se a existência de avarias. Visualmente, não foram identificados sinais de trincas ou descolamento do reforço, salvo os que já existiam. De um modo geral, o protótipo apresentou-se muito resistente, mesmo com algumas imperfeições de fabricação, o que torna o produto tecnicamente viável.

Apesar dos bons resultados, é possível realizar melhorias para que o produto se torne ainda mais resistente e confiável. Como o principal fator de fragilidade está relacionado à deslaminação das fibras de vidro, deve-se tomar extremo cuidado durante a fabricação dos moldes, uma vez que estes implicam diretamente nos resultados da laminação.

O molde utilizado para laminação não estava perfeitamente acoplado, implicando algumas imperfeições ao produto final. Por um lado, esta ocorrência possibilitou chegar à conclusão de que o estado de acabamento e qualidade dos moldes são fatores diretamente relacionados à qualidade da laminação da telha. Os próximos protótipos deverão ser fabricados em moldes de qualidade superior.

4.4.1 Lições aprendidas

É necessário aprimorar o processo de fabricação do molde nos próximos protótipos, uma vez que este influenciou significativamente na laminação do compósito. Porém, a telha desenvolvida apresentou excelente impermeabilidade, boa estabilidade térmica e boas propriedades mecânicas, mesmo com a identificação visual de algumas imperfeições.

O projeto desenvolvido foi capaz de suportar cargas estáticas de 1,13KN. O teste dinâmico realizado com a carga de 0,76KN simulou uma condição real de movimentação sobre a telha, apresentando resultados satisfatórios no que tange aos critérios de resistência e estabilidade mecânica.

O produto apresentou uma geometria bem definida, boa aparência, leveza e translucidez. Suas dimensões permitem fácil manipulação, transporte e

instalação. Por apresentar uma geometria ondulada, seguindo os moldes do telhão, pode ser utilizada em conjunto, permitindo entrada de luz no ambiente.

Estas foram as principais características encontradas para definição conceitual do produto final, além de contribuir com a redução de deposição de garrafas PET no ambiente.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O compósito desenvolvido para fabricação da telha apresentou propriedades mecânicas satisfatórias no que tange à resistência mecânica e estabilidade térmica. Se comparado à telha de PVC, produto já existente no mercado, o compósito apresentou uma resistência 5 vezes maior.

O compósito não fraturou durante o ensaio de flexão, apresentando comportamento de material dúctil. As tensões axial e de cisalhamento máximas encontradas para o compósito foram, em média, 91,28MPa e 0,58MPa, respectivamente, enquanto a resistência à tração foi, em média, 75,04MPa com um módulo de elasticidade de 6,41GPa. Durante o ensaio, o material não apresentou ruptura total da seção transversal, mas o cisalhamento da resina e da fibra de vidro, causando sua deslaminação.

Quanto à absorção de impacto, o compósito absorveu cerca de 40% da energia de impacto, resultando em uma resistência ao impacto na ordem de 67,7KJ/m². A fibra de vidro contida no compósito contribuiu significativamente para absorção da energia de impacto.

A TGA das amostras de laminados do material mostrou que ele apresentou excelente estabilidade térmica até 105°C, tendo maior degradação nas faixas de temperatura de 320 a 700°C, cerca de 60% da massa inicial, com resíduo final de massa próximo a 32%, equivalente à fibra de vidro, que só inicia sua degradação a partir de 2000°C. Esta, por sua vez, atribui ao compósito uma melhor estabilidade térmica se estiver melhor agregada com a resina epóxi e a matriz de PET.

Os testes realizados na telha desenvolvida a partir de um compósito de PET revestido com fibra de vidro e resina epóxi mostraram ter ela boa resistência mecânica e boa estabilidade térmica às temperaturas ambiente (18 a 34°C). Ademais, a telha apresentou boa aparência e facilidade de manuseio e transporte, além de ser 2,5 vezes mais leve que a telha ondulada de fibrocimento, tendo resistido sem danos à carga estática de 1,13KN e dinâmica de 0,76KN. Portanto, além de sustentável, o produto apresentou-se tecnicamente viável.

A metodologia integrada de produto aplicada ao projeto facilitou a identificação de melhorias que poderão ser atribuídas aos próximos protótipos,

a fim de melhorar ainda mais suas propriedades. A seguir, estão descritas algumas sugestões para trabalhos futuros que poderão aprimorar as características da telha desenvolvida, assim como do compósito.

- Aplicar o mesmo procedimento de laminação em outros materiais poliméricos, por exemplo o PP;
- Aplicar outras técnicas termoanalíticas;
- Aplicar outros tipos de fibras como material de reforço;
- Aplicar outros tipos de resinas como material de agregação;
- Estudar a aplicação do compósito no desenvolvimento de outros produtos;
- Desenvolver o processo detalhado do projeto;
- Melhorar o procedimento de soldagem das tiras de PET;
- Projetar melhoria dos moldes para laminação do compósito;
- Projetar melhoria no processo de fabricação das matrizes de PET, principalmente em relação ao corte das tiras e processo de trama;
- Realizar a compatibilidade do produto com geometrias mais complexas;
- Realizar comparação dos testes de tração, impacto e flexão com outros materiais presentes nas telhas comercializadas;
- Realizar ensaio de fadiga térmica e mecânica;
- Realizar ensaio de impacto charpy;
- Realizar um estudo de viabilidade econômica desta telha e desenvolver o projeto detalhado do produto;
- Variar a largura das tramas na matriz e comparar os resultados.

REFERÊNCIAS¹⁴

ABPET. Censo da reciclagem de PET no Brasil. 10^a ed, São Paulo, 2016.

AKCELRUD, L. Fundamentos da ciência dos polímeros. Editora Manole Ltda, Barueri, São Paulo, 2007.

ALMEIDA, F. O bom negócio da sustentabilidade. Nova fronteira, Rio de Janeiro, 2009.

ALMEIDA, I. S. *et al.* Reciclagem de garrafas PET para fabricação de telhas. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT, v. 1, n. 3, p. 83-90, 2013.

AL-SABAGH, A. M. *et al.* Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. Egyptian Journal of Petroleum, v. 25, n. 1, p. 53-64, 2016.

ANDRADY, A. L. & NEAL, M. A. Applications and societal benefits of plastics. Phil. Trans. R. Soc. B, 364:1977-1984, 2009.

ASIMOV, M. Introduction to design: fundamentals of engineering design. New Jersey, Prentice Hall, 1962.

ATTA, T. Difference between Izod and Charpy test | Green Mechanic. Disponível em: <<http://www.green-mechanic.com/2014/04/difference-between-izod-and-charpy.html>> Acesso em: 14 set. 2019.

BACK, N. *et al.* Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem. Editora Manole, Barueri, SP, 2008.

BARNES, D. K. A., GALGANI, F., THOMPSON, R. C. & BARLAZ, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B, 364:1985–1998, 2009.

BARRETO. N. Tipos de telhas mais comuns e suas características. Disponível em :<<https://www.tuacasa.com.br/tipos-de-telhas/>> Acesso em: 19 set. 2019.

BERGAMO, R. L. *et al.* Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas para empresas de pequeno e médio porte. Santa Maria, RS, 2014.

BÍBLIA, Português. A Bíblia Sagrada: Antigo e Novo Testamento. Tradução de João Ferreira de Almeida. Edição rev. e atualizada no Brasil. Brasília: Sociedade Bíblia do Brasil, 2011.

BOCZAR, E. V.; ANDRADE, B. M. R.; FERNANDES, G. A. Avaliação da resistência mecânica de compósitos poliméricos com reforços híbridos de fibra de aramida e fibra de vidro. UNIFEI/IEM, Itajubá, MG, 2012.

¹⁴ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBT 6023).

BUCKNALL, C. B.; GILBERT, A. H. *Polymer*, vol.30, p. 213, 1989.

CALLISTER, W. D; RETHWISCH, D. G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2013.

CANEVAROLO Jr., S. V.; "Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros"; Editora Artliber; 2ª edição; São Paulo, 2006; pág. 203-208.

CASAROTTO FILHO, N.; FÁVERO, J. E. E. *Gerência de projeto/Engenharia simultânea*. São Paulo: Atlas, 2006.

CORYELL, A. E. *The design process: 12 steps that turn ideas into hardware*. *Machine Design*. P.154 – 161, 1967.

COSTA T. H. S., FONTANA J. A. C., KOSSAKA J., TARASZKIEWICZ T.; *Estudo do Comportamento Mecânico de Alguns Termoplásticos*; Departamento de Engenharia Mecânica/DEMEC; Universidade Federal do Paraná; Curitiba, PR, 1998.

DA SILVA SPINACÉ, M. A.; DE PAOLI, M. A. *A tecnologia da reciclagem de polímeros*. *Quim. Nova*, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

DA SILVA, A. M.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. *Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars*. *Construction and Building Materials*, v. 71, p. 226-236, 2014.

DA SILVA, E. A.; LINS, V. F. C.; COTTING, F. *Processo de moagem de garrafas pet pós-consumo*. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 5, n. 1, p. 0033-0036, 2019.

DE CERQUEIRA, M. H.; PAK, Engenheiro de Desenvolvimento Ambiental Tetra. *Placas e telhas produzidas a partir da reciclagem do polietileno/alumínio presentes nas embalagens tetra pak*. *Artigos Técnicos, Tetra Pak*, 2003.

DIETZ, A. GH. "Composite materials: A general overview." *Theory and Design of Wood and Fiber Composite Materials* 3 (1972).

DUFFY, A. H. B.; ANDREASEN, M. M.; MACCALLUM, K. J.; & REIJERS, L. N. *Design coordination for concurrent engineering*. *Journal of Engineering Design*, 4(4), p. 251-265, 1993.

EHRIG R. J.; CURRY M. J. *Plastics recycling: products and processes*. Ehrig R.J. Oxford University Press: New York, 1992.

FERREIRA, G. A. *Avaliação das propriedades mecânicas de peças densas a partir do processo de prensagem a quente de pó de poli etileno tereftalato (PET) reciclado*. UFJF, Minas Gerais, 2017

FERREIRA, O. P.; Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, laudo datado de 13/12/2001.

FONSECA, A. J. H. “Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional”. 180p. Tese (Doutorado) – PPGEM, UFSC. Florianópolis, SC, 2000.

FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, E. Propriedades Mecânicas: Ensaios Fundamentais. 2015.

GALBIATI, A. F. O gerenciamento integrado de resíduos sólidos e a reciclagem. São Paulo, 2012.

GAMA, D. P. N. Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche. Dissertação (Mestrado) - PGMEC, UFF, Niterói, RJ, 2017.

GANDARA, M. Compósitos de PET reciclado com fibra de cana-de-açúcar tratada por explosão a vapor. Revista Matéria, v. 22, n. 4, 2017.

GONÇALVES, S. C; FORNARI, C. C. Avaliação do comportamento mecânico do poliéster ortoftálico reticulado com adição de pet reciclado. Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET), v. 6, n. 6, p. 975-982, 2012.

GORNINSKI, J. P; TONET, K. G. Avaliação das propriedades mecânicas e da flamabilidade de concretos poliméricos produzidos com resina PET e retardante de chamas reciclados. Ambiente Construído, v. 16, n. 2, p. 69-88. 2016.

HOLGUIN, I. C. C. Estudo do comportamento do PP e PET reciclados submetidos a intempéries e suas possíveis aplicações. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação 021A/2015, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 99 p. 2015

HOPEWELL, J., DVORAK, R. & KOSIOR, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. Phil. Trans. R. Soc. B, 364:2115-2126, 2009.

HUTHWAITE, B.; SCHNEBERGER, D. Design for competitiveness: the teamwork approach to product development. EUA: Institute for Competitive Design, 1992.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 178. Plastics – determination of flexural properties. 4º ed. 2015.

JARAMILLO, E. B. *et al.* Comportamiento mecánico del polietileno tereftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas/Mechanical behavior of polyethylene terephthalate (PET) and geotechnical applications. Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia, n. 70, p. 207, 2014.

JONES, R. M. Mechanics of composite materials. Vol. 193. Washington, DC: Scripta Book Company, 1975.

KAW, A. K. Mechanics of composite materials. CRC press, 2005.

KERZNER, H. Project management: a systems approach in planning, scheduling and controlling. 6.ed. New York, John Wiley & Sons, 2001.

LEWIS, J. P. The project manager's desk reference. 3.ed. New York, McGraw-Hill, 2000.

MACIEL, N. O. R. Análise Mecânica Comparativa de Tração, Flexão e Impacto entre Compósitos Reforçados com Fibras de Curauá e Compósitos Reforçados com Fibras de Vidro. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual Norte Fluminense–UENF, Campos dos Goytacazes, RJ. 2017.

MANCINI, S. D. *et al.* Reciclagem de PET advindo de garrafas de refrigerante pós-consumo. *Polímeros: ciência e tecnologia*, v. 8, n. 2, 1998.

MORAES, S. R. P. *et al.* Avaliação de polímeros termoplásticos recicláveis como materiais componentes de telhas e tijolos. Artigo do projeto de pesquisa: Avaliação de polímeros termoplásticos recicláveis como materiais componentes de telhas e tijolos. Unidade de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual de Goiás, 2010.

NETO, C. L. Simulação numérica da laminação a frio no laminador Sendzimir número 2 da Acesita. Dissertação de mestrado. UFMG. Belo Horizonte, 2006.

NETZSCH. Catalogo técnico. Disponível em: <<https://www.netzsch-thermal-analysis.com/pt/produtos-solucoes/termogravimetria-calorimetria-exploratoria-diferencial-simultaneas/sta-449-f3-jupiter/>> Acesso em: 23 de set. 2019.

PAHL, G.; BEITZ, W. Konstruktionslehre. Berlim, Spriner Verlag, 1977.

PAYÁN, L. *et al.* Study of the influence of storage conditions on the quality and migration levels of antimony in polyethylene terephthalate-bottled water. *Food Science and Technology International*, v. 23, n. 4, p. 318-327, 2017.

PEREIRA, F. C.; OLIVEIRA, A. L.; TURRA, A. Gestão de resíduos sólidos no ambiente marinho: pellets plásticos. V Simpósio de Oceanografia Brasileira. Oceanografia e Políticas Públicas. Santos, SP, p. 10-17, 2011.

PLASTBRINQ. Telha de plástico (PVC) - vantagens e desvantagens. Publicado em 18 de novembro de 2018. Disponível em: <<https://plastbrinq.com.br/telha-de-plastico/>>. Acessado em 12 de outubro de 2019.

PMI - PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Um guia do conjunto de conhecimentos em gerenciamento e projetos (PMBOK ®Guide). Pennsylvania: Project Management Institute, 4. ed., 2008.

REIS, J. M. L.; CARNEIRO, E. P. Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars. *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, p. 107-111, 2012.

ROMANO, L. N. Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas. Tese (Doutorado) - PPGEM, UFSC, Florianópolis, 2003.

SALAMONI, R.H.; PINHEIRO, R.J.B.; NUMMER, A.V. Processo operacional da Central de Tratamento de Resíduos da Caturrita – Santa Maria, RS. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n.14, p.43-50, 2009.

SANTOS, J. A. *et al.* Matéria-prima gerada da reciclagem de garrafas pet e seus produtos derivados. *Revista Metropolitana de Sustentabilidade (ISSN 2318-3233)*, v. 5, n. 2, p. 03-13, 2015.

SILVA, F. A. Tenacidade de materiais compósitos não convencionais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC. Rio, Rio de Janeiro, RJ.2004

SILVA, L. J. D.; FRANCISCON, M. S. C.; DA ROCHA, R. C. Utilização de telhas de pet reciclado na construção civil. *Revista Ciências do Ambiente On-Line*, v. 6, n. 1, 2010.

SOUZA, S. A. de. Ensaio mecânicos de materiais metálicos – Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo: Edgard Blucher, 5ª Ed. 1982.

TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE. Ensaio de materiais. Dureza rockwell, Aula 12. São Paulo, 1998.

TESKE, S.; GONÇALVES, P. F. A.; NAGALLI, A. Development of a conceptual model of an ecologic tile using building plasters waste. *Cerâmica*, v. 61, n. 358, p. 190-198, 2015.

ULLMAN, D. G. *The mechanical design process*. New York: McGraw-Hill, p.337, 1992.

VALDERRAMA OCORÓ, M. F. *et al.* Estudio dinámico del reciclaje de envases pet en el Valle del Cauca. *Revista Lasallista de Investigación*, v. 15, n. 1, p. 67-74, 2018.

VIANTE, M. F. *et al.* Magnetic microspheres composite from poly (ethylene terephthalate)(PET) waste: Synthesis and characterization. *Journal of cleaner production*, v. 198, p. 979-986, 2018.

WANG, X. *et al.* Thermal Degradation Behaviors of Epoxy Resin/POSS Hybrids and Phosphorus-Silicon Synergism of Flame Retardancy. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer physics*, [s. l.], v. 48, p. 693–705, 2010b. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0406218>>

WOODSON, T. T. Introduction to engineering design. New York, Mc-Graw-Hill, 1966.

YUE, Q. F. *et al.* Glycolysis of poly (ethylene terephthalate)(PET) using basic ionic liquids as catalysts. *Polymer Degradation and Stability*, v. 96, n. 4, p. 399-403, 2011.

ZANCANELLA, A. C. B. *et al.* Obtaining and Characterizing Polyester Resin Compound With Fiberglass and PET. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Curitiba, PR, Brasil, 3-8 Dezembro, 2017

ZHANG, H.; WEN, Z. The consumption and recycling collection system of PET bottles: A case study of Beijing, China. *Waste Management*, v. 34, n. 6, p. 987-998, 2014.

ZUCCHERATTE, A. C. V.; FREIRE, C. B.; LAMEIRAS, F. S. Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethylthephtalate. *Construction and Building Materials*, v. 151, p. 859-865, 2017.

APÊNDICE A – Gráficos de resistência à tração e módulo de elasticidade

Resistência à tração e módulo de elasticidade do material compósito constituído de matriz de PET tramado reforçado com fibra de vidro e resina epóxi.

Gráfico de tensão x deformação do corpo de prova T1#5

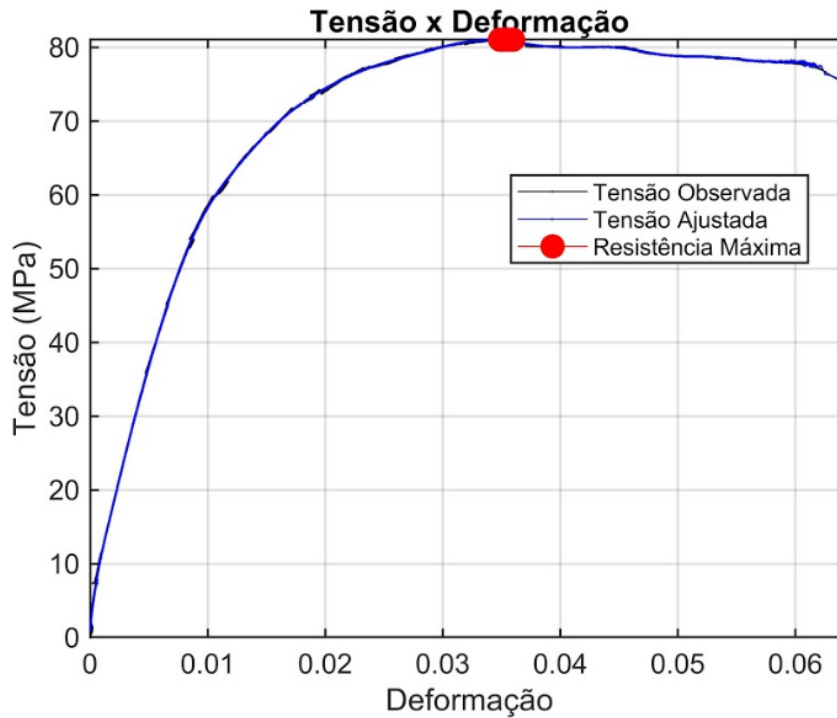


Gráfico do limite de elasticidade do corpo de prova T1#5

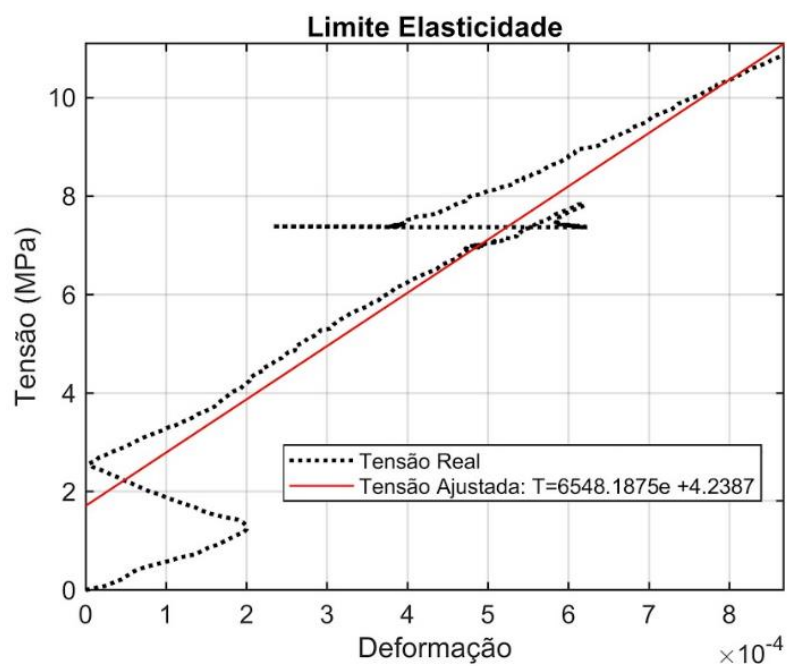


Gráfico de tensão x deformação do corpo de prova T2#5

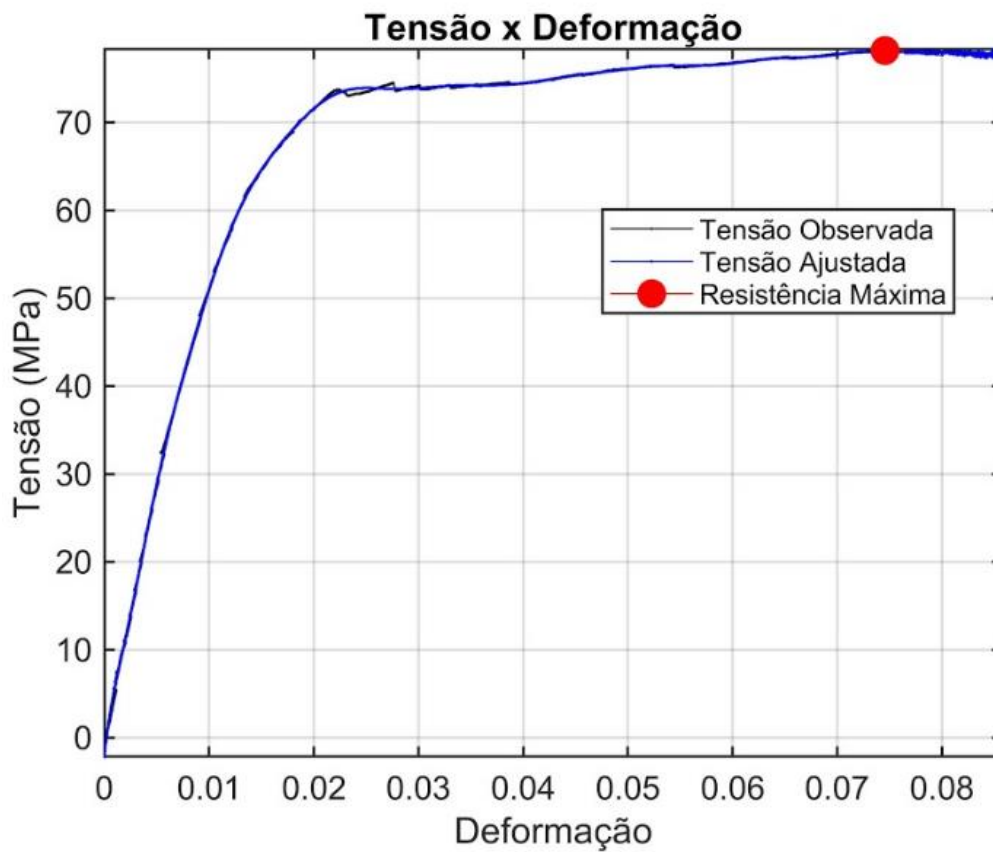


Gráfico do limite de elasticidade do corpo de prova T2#5

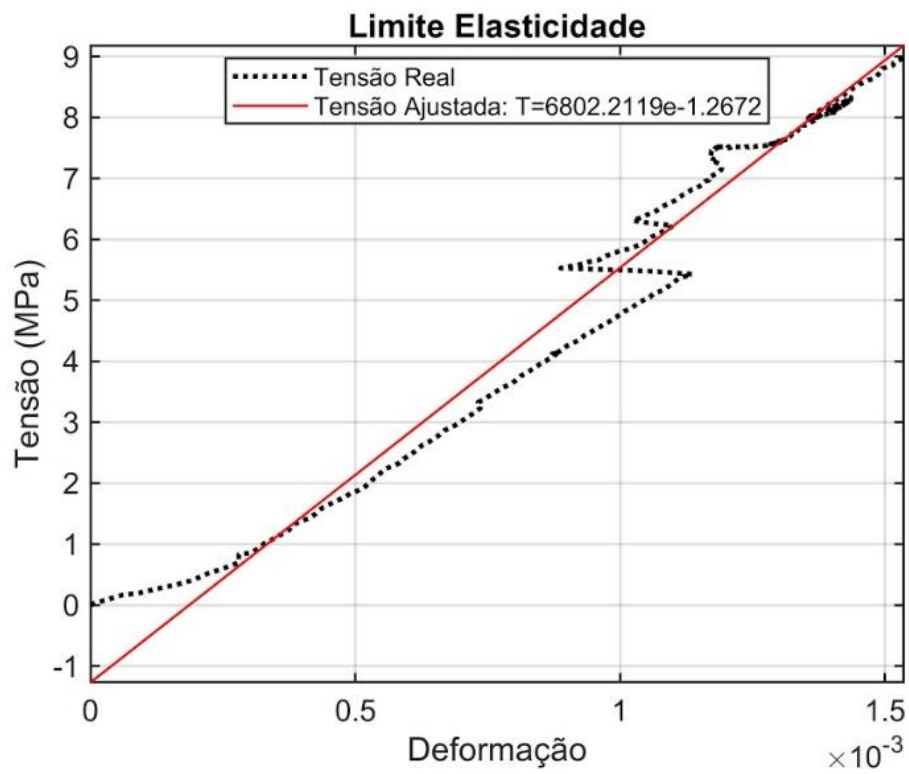


Gráfico de tensão x deformação do corpo de prova T3#5

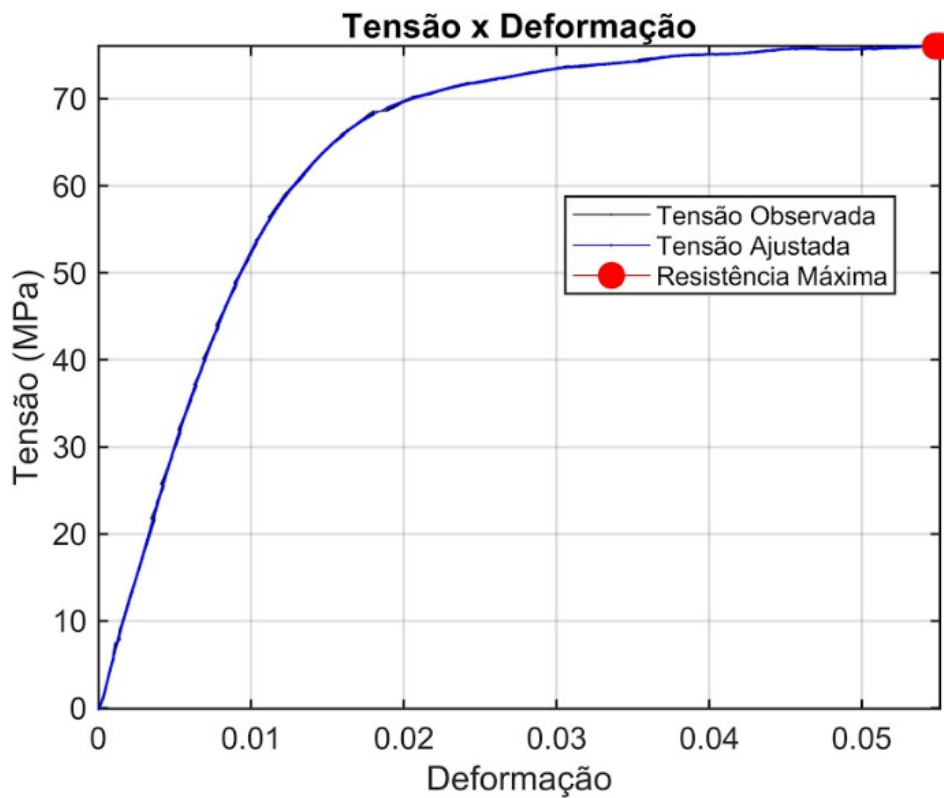


Gráfico do limite de elasticidade do corpo de prova T3#5

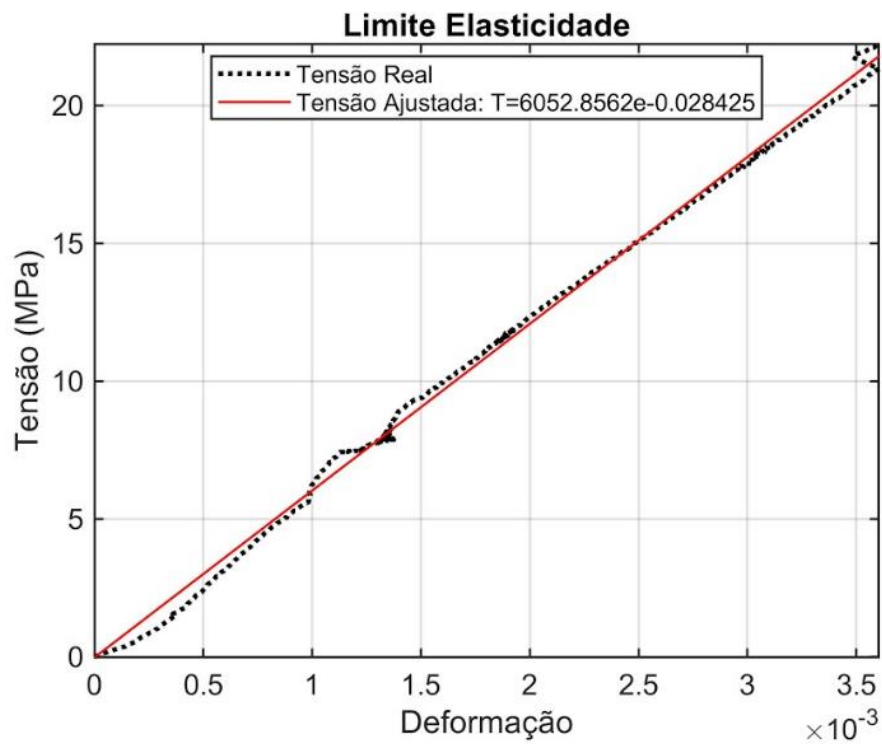


Gráfico de tensão x deformação do corpo de prova T4#5

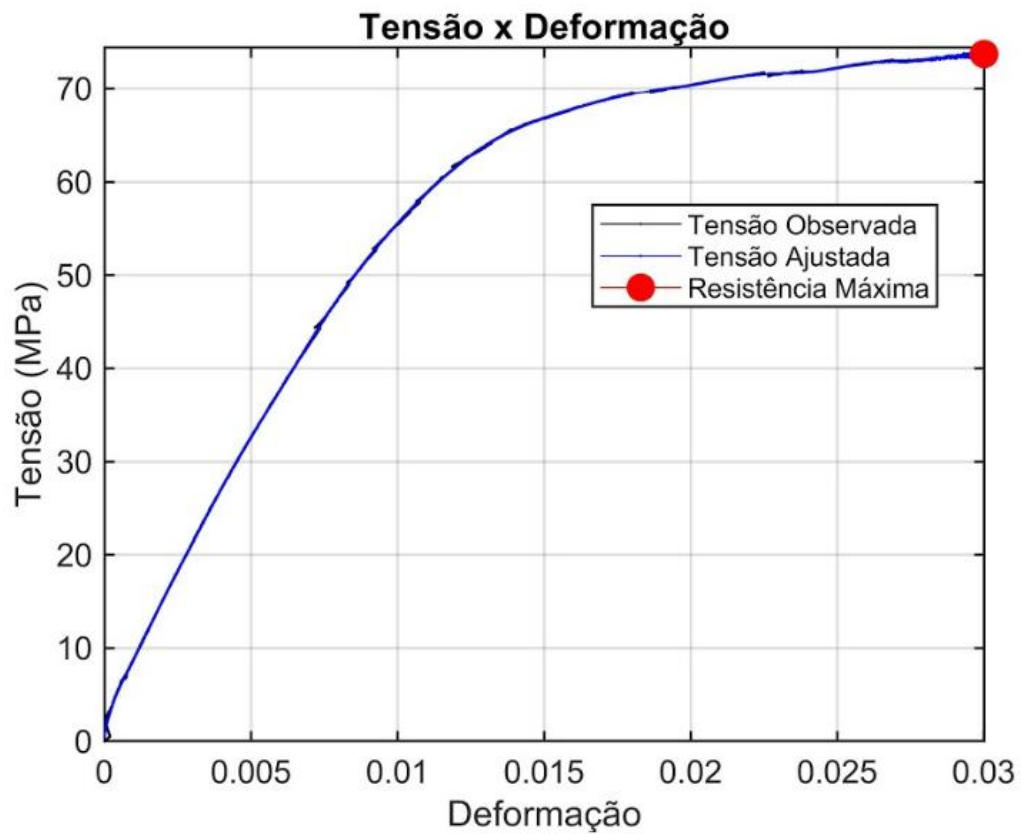


Gráfico do limite de elasticidade do corpo de prova T4#5

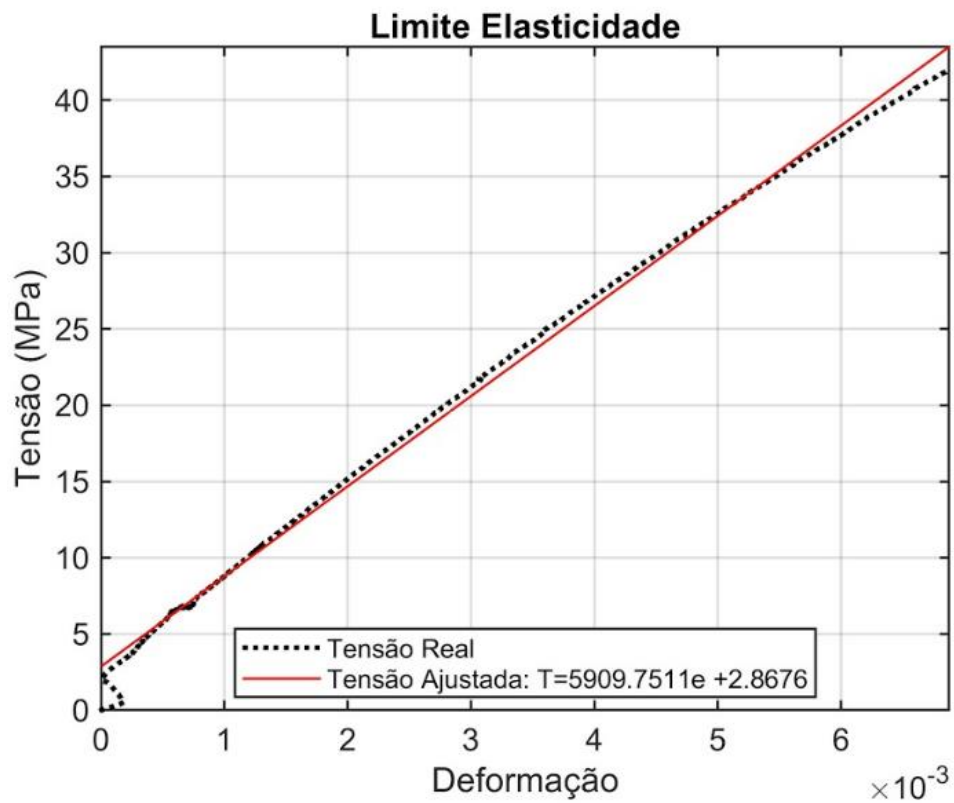


Gráfico de tensão x deformação do corpo de prova T5#5

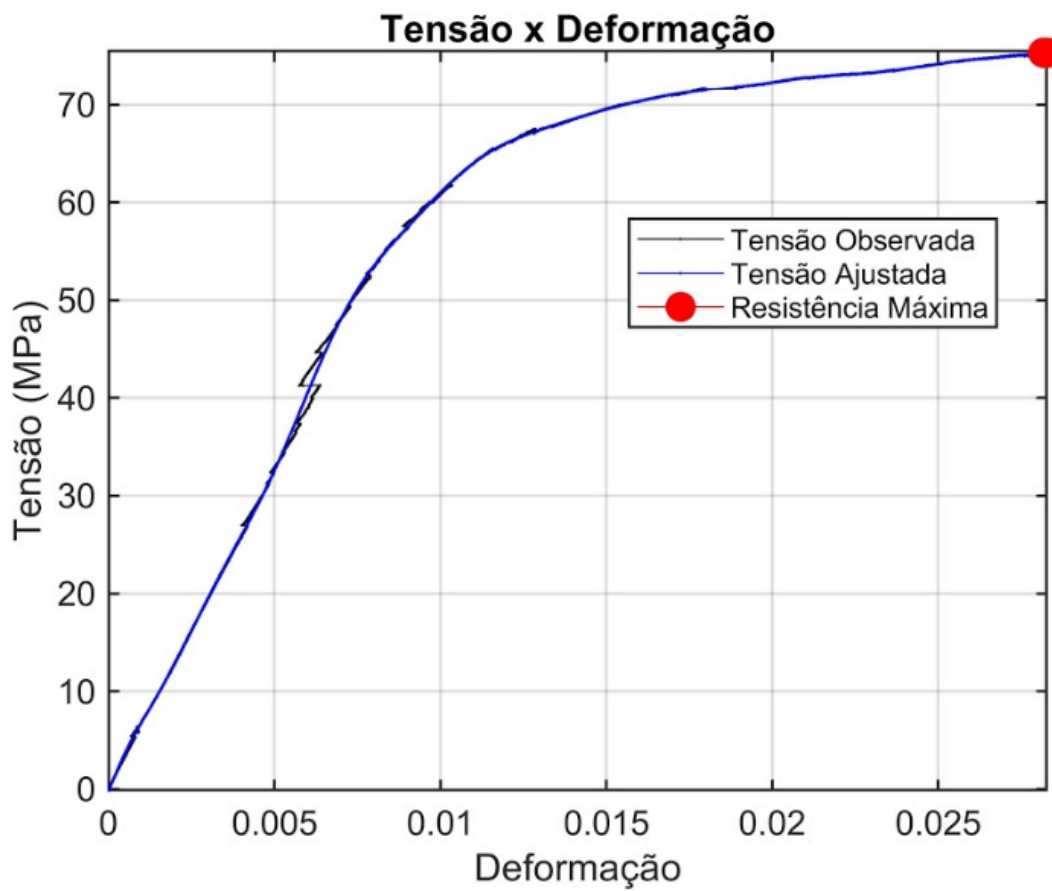
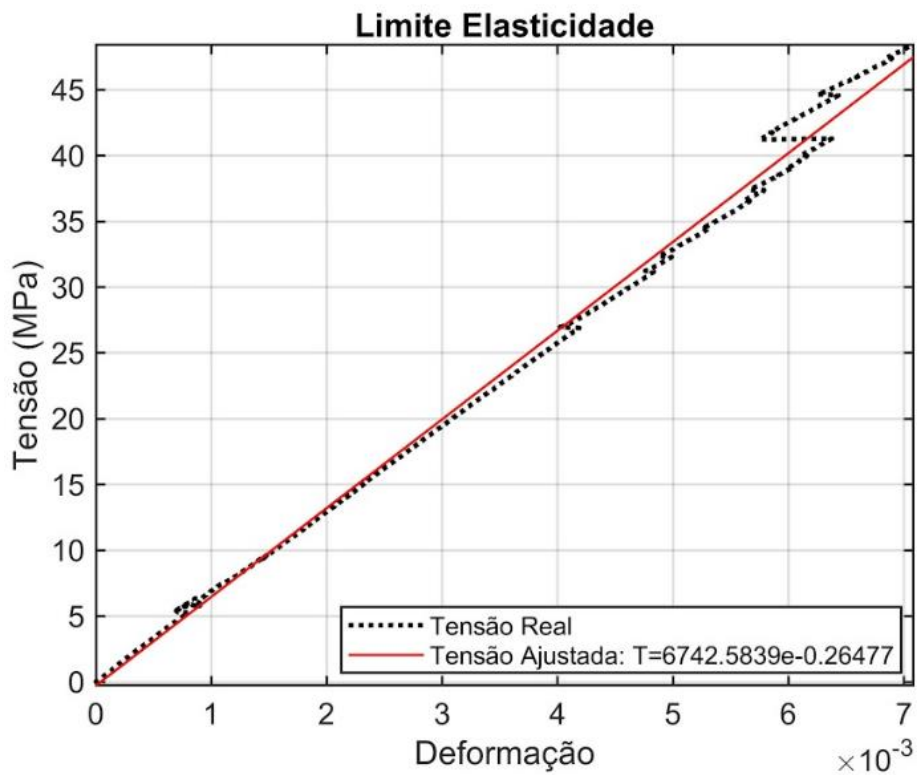


Gráfico do limite de elasticidade do corpo de prova T5#5



APÊNDICE B – Gráficos de resistência à flexão

Resistência à flexão do material compósito constituído de matriz de PET tramado reforçado com fibra de vidro e resina epóxi.

Gráfico de força x deslocamento da mesa do corpo de prova F1#5

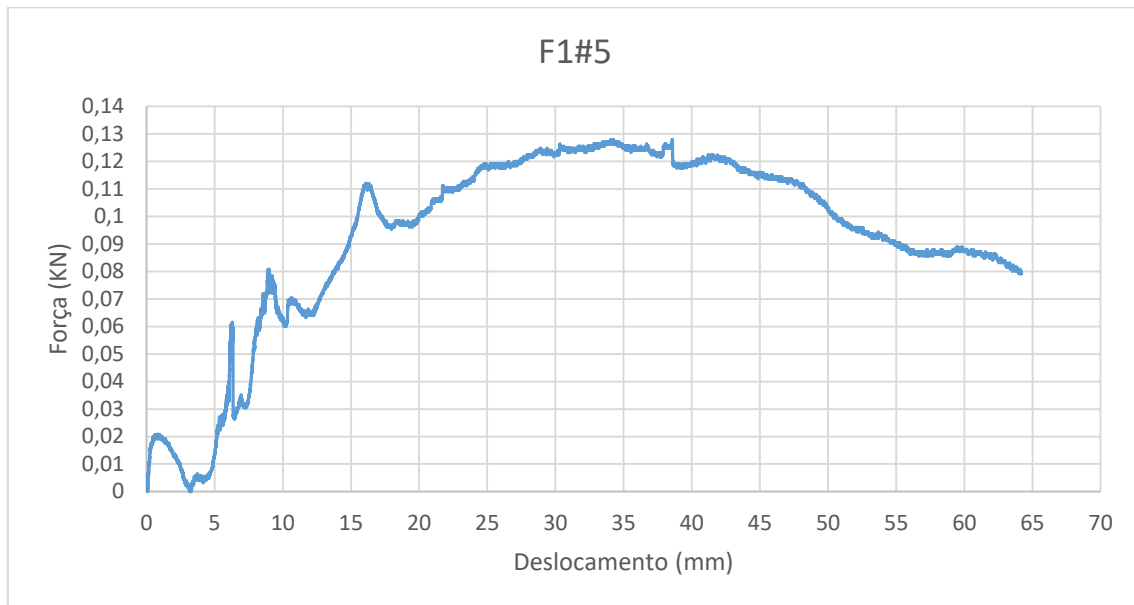


Gráfico de força x deslocamento da mesa do corpo de prova F2#5

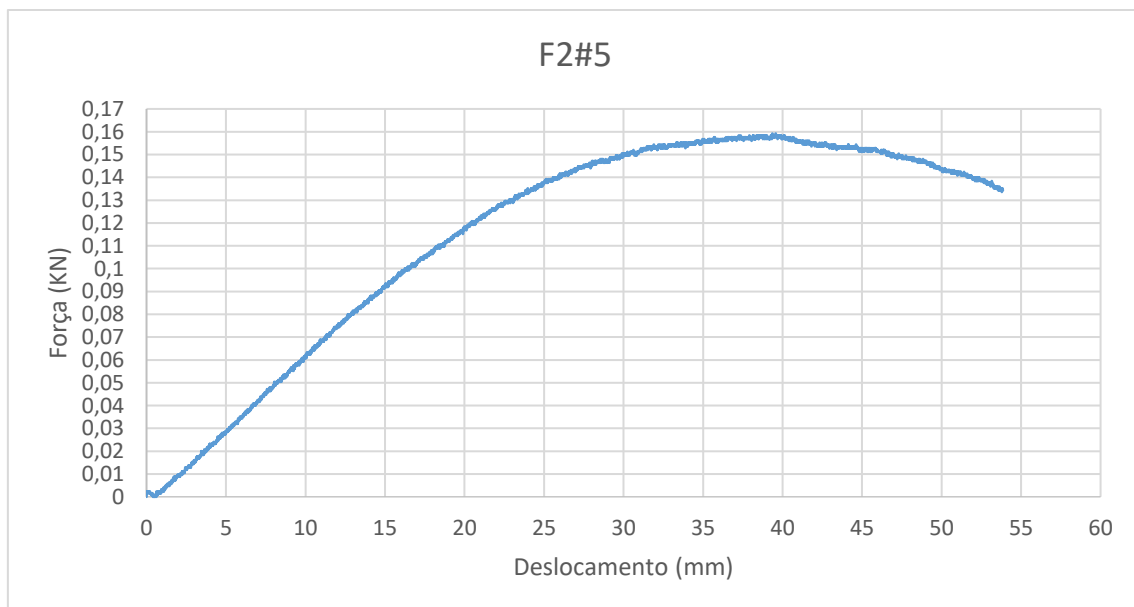


Gráfico de força x deslocamento da mesa do corpo de prova F3#5

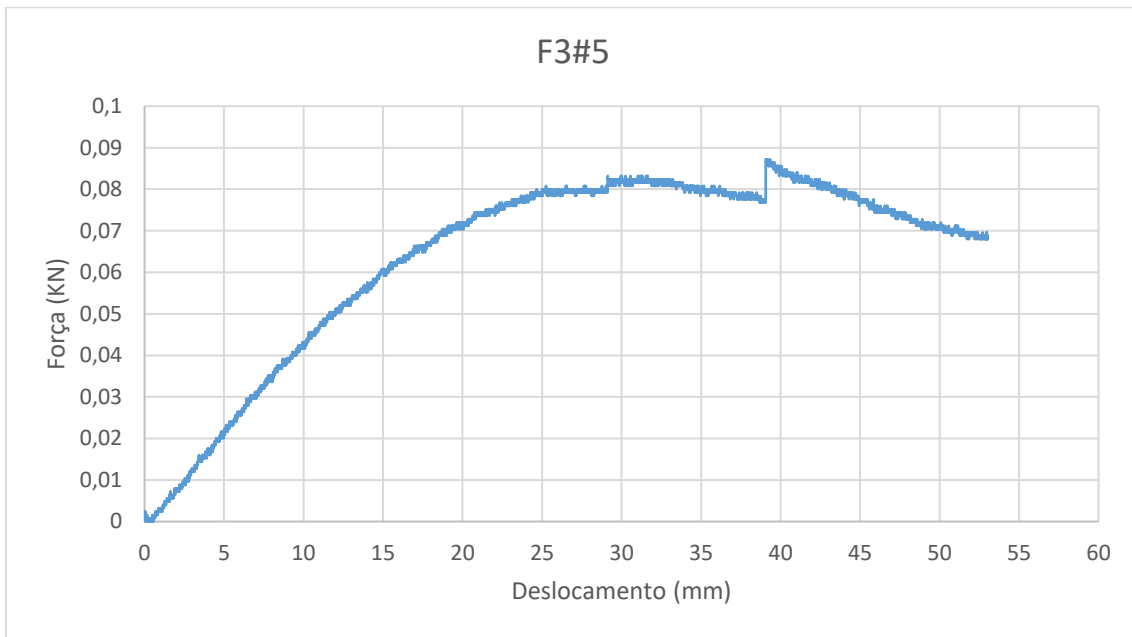


Gráfico de força x deslocamento da mesa do corpo de prova F4#5

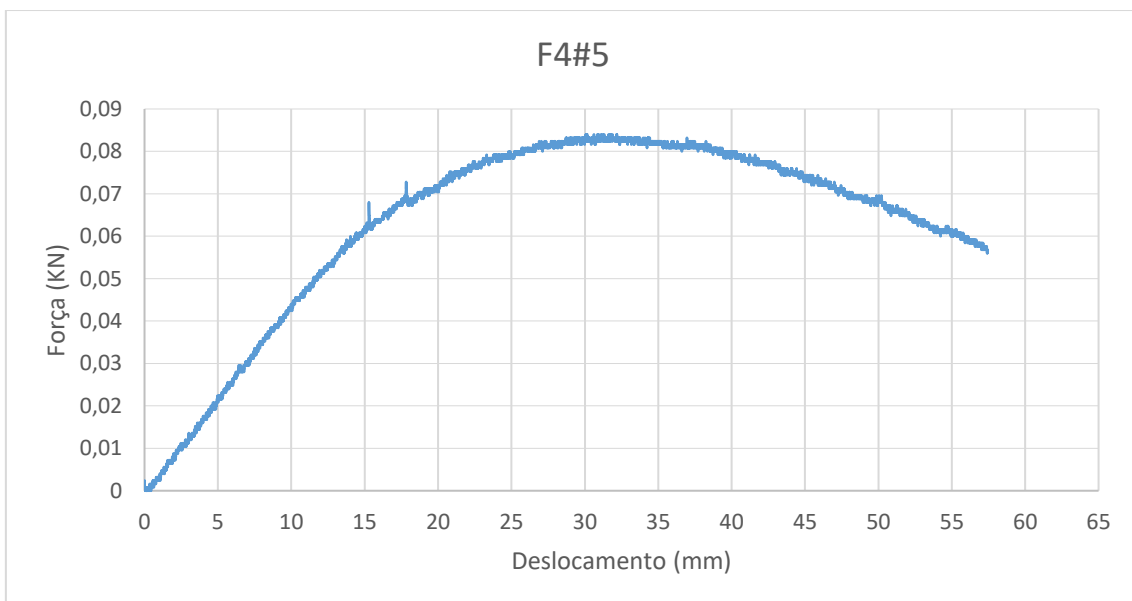
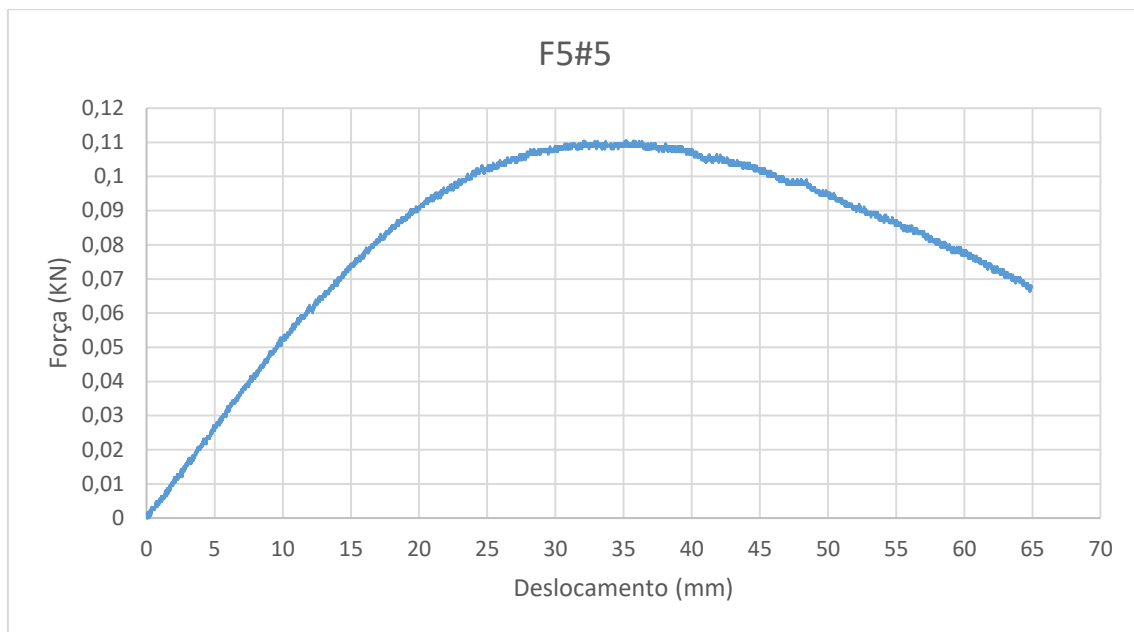


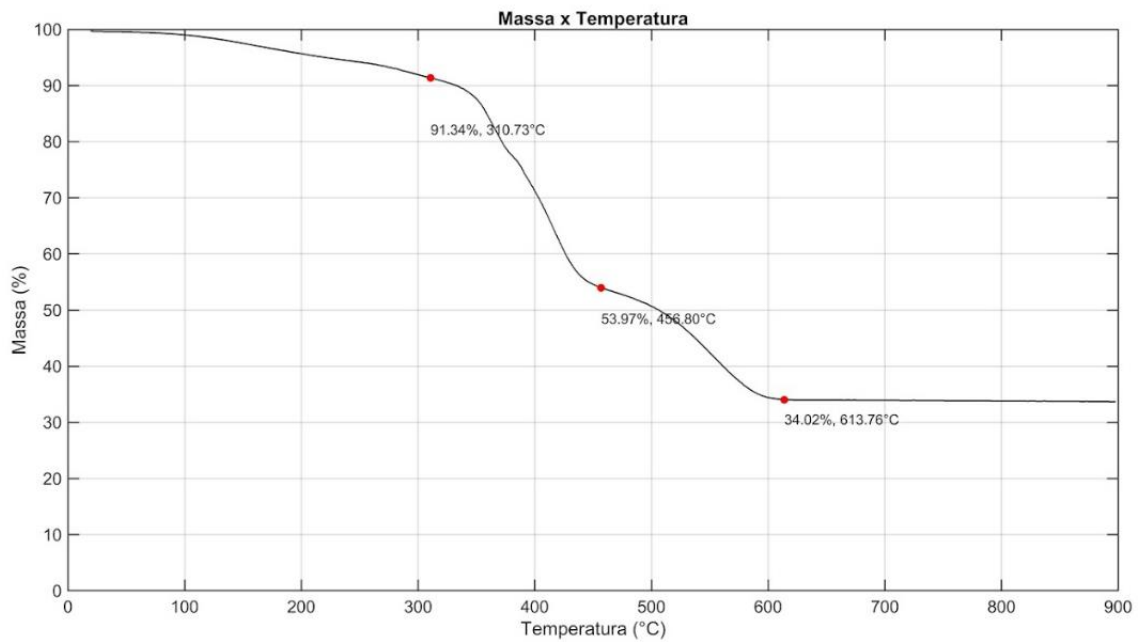
Gráfico de força x deslocamento da mesa do corpo de prova F5#5



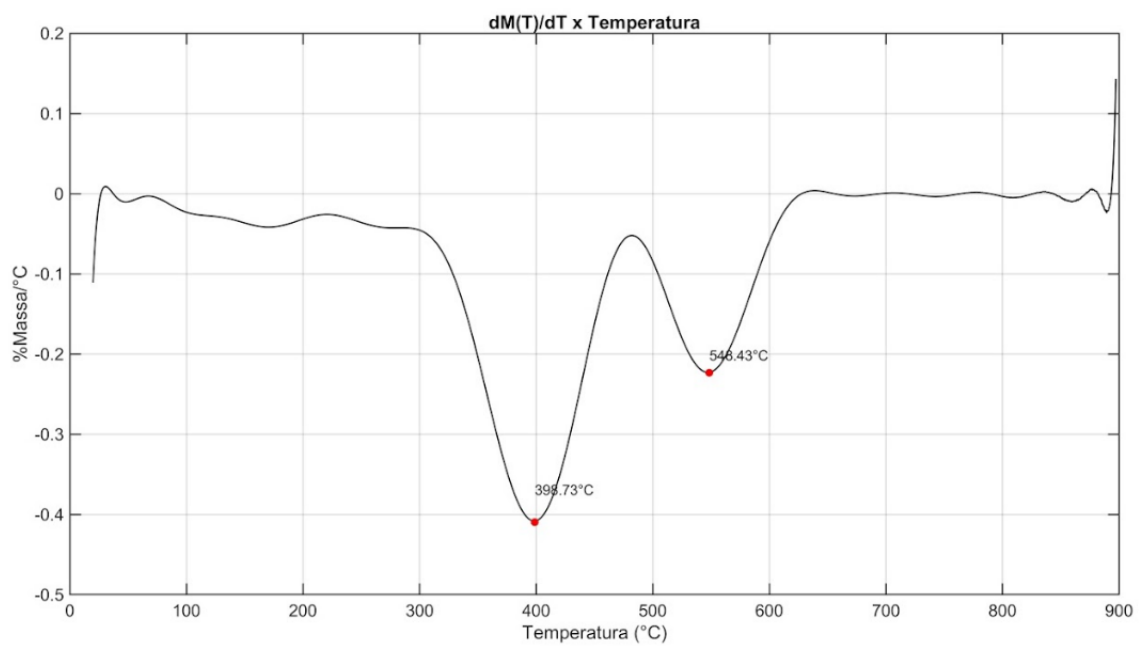
APÊNDICE C – Curvas TGA e DTGA

Análise termogravimétrica TGA e DTGA da amostra do laminado 1.

Curva TGA L1

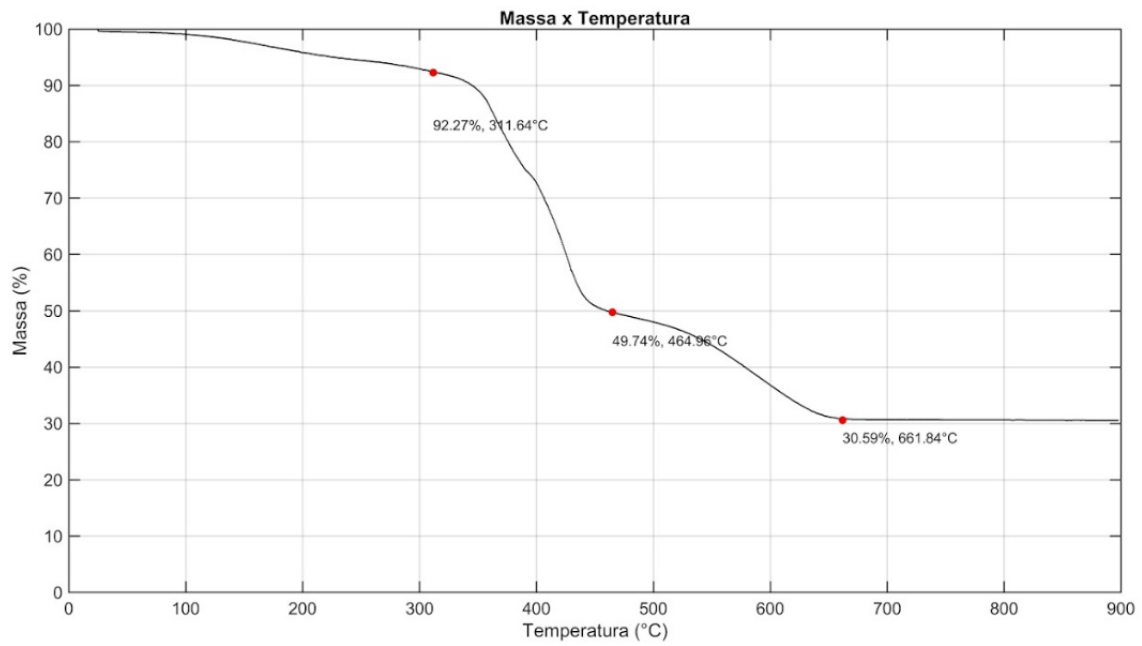


Curva DTGA L1

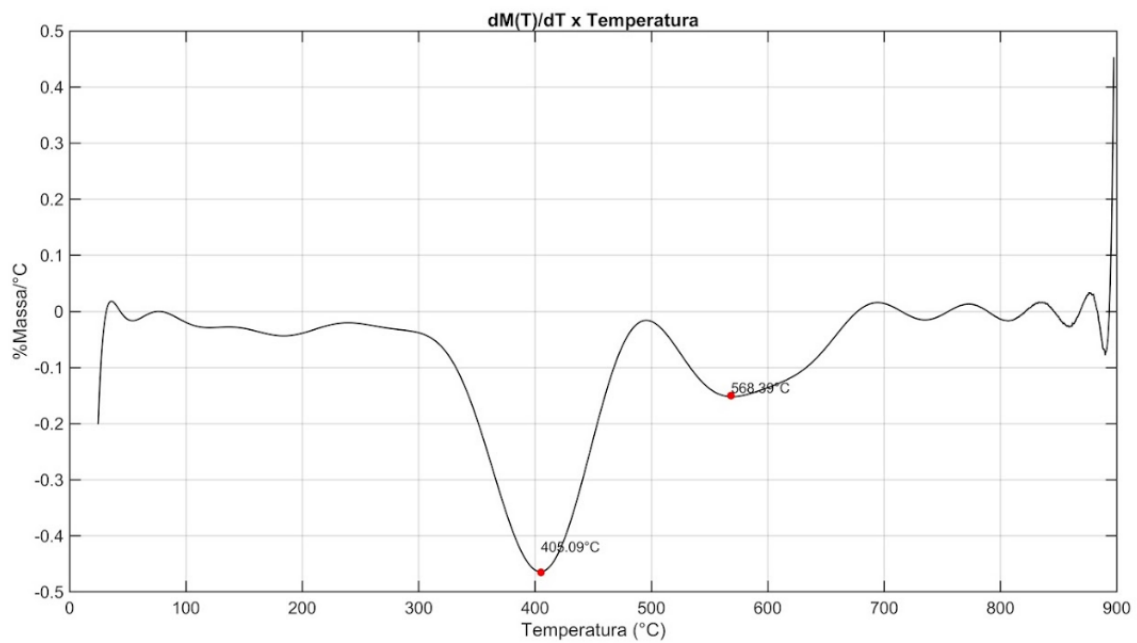


Análise termogravimétrica TGA e DTGA da amostra do laminado 2.

Curva TGA L2

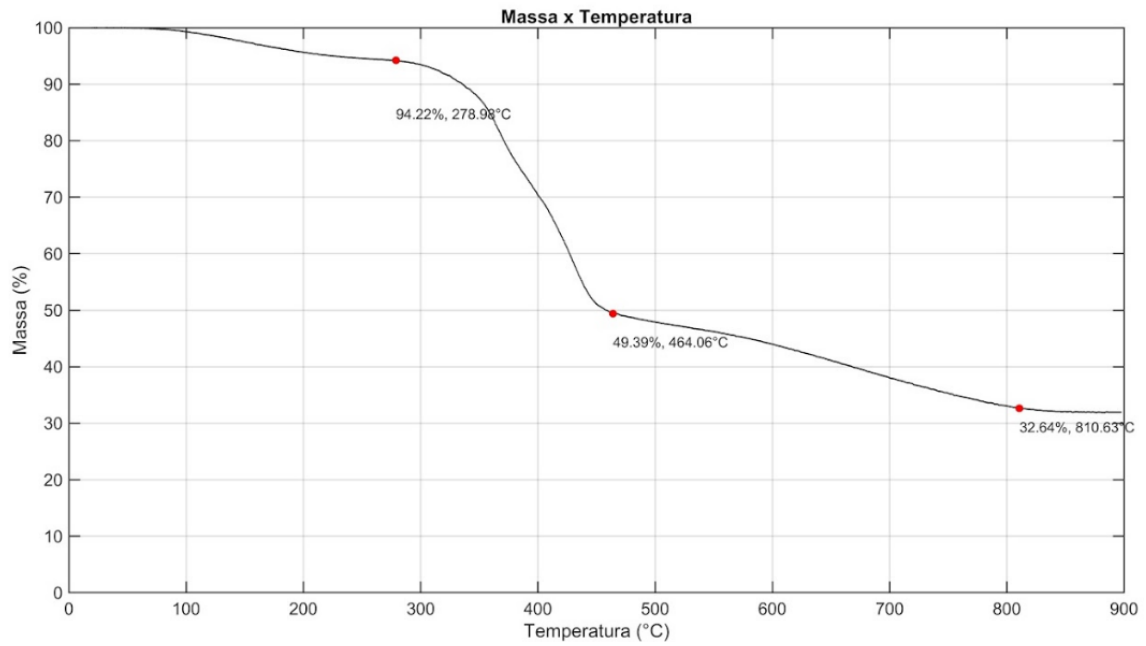


Curva DGA L2

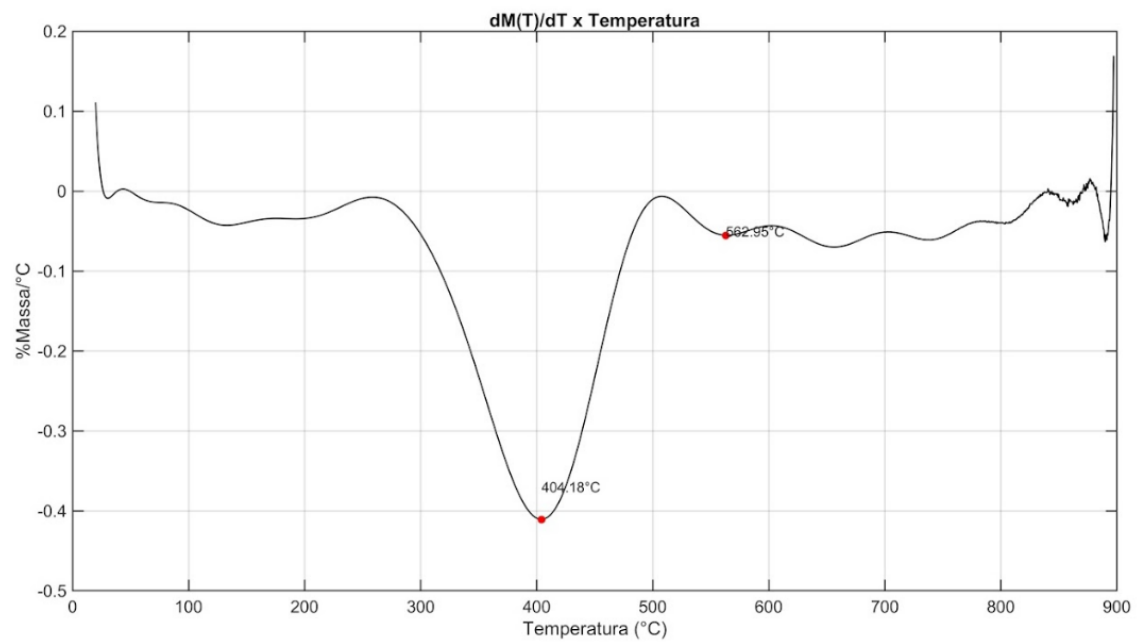


Análise termogravimétrica TGA e DTGA da amostra do laminado 3.

Curva TGA L3



Curva DTGA L3



APÊNDICE D – Desenho do protótipo

Desenho do protótipo da telha (mm)

