

Sistema FIEB



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU

DANIEL VIANNA GOES ARAUJO

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM  
RESÍDUOS DE FIBRAS PET PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL  
COMO ELEMENTO DE REVESTIMENTO**

MESTRADO EM GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Salvador, 2021

DANIEL VIANNA GOES ARAUJO

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM  
RESÍDUOS DE FIBRAS PET PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL  
COMO ELEMENTO DE REVESTIMENTO.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientadora: Prof. Dra. Joyce Batista Azevedo

Coorientadora: Prof. Dra. Josiane Dantas Viana Barbosa

Salvador, 2021

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

F471p Araujo, Daniel Vianna Goes

Desenvolvimento de compósito polimérico reforçado com resíduos de fibras pet para aplicação na construção civil como elemento de revestimento / Daniel Vianna Goes Araujo. – Salvador, 2021.

66 f.: il. color

Orientador: Prof. Dr<sup>a</sup>. Joyce Batista Azevedo  
Coorientador: Prof. Dr<sup>a</sup>. Josiane Dantas Viana Barbosa

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2021.

Inclui referências.

1. Polímero - Compósito. 2. Fibra PET. 3. Resíduo industrial. 4. Revestimento. 5. Construção Civil. I. Universitário SENAI CIMATEC. II. Azevedo, Joyce Batista. III. Barbosa, Josiane Dantas Viana IV. Título.

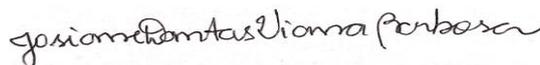
CDD 668.9

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC****Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM RESÍDUOS DE FIBRAS PET PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO ELEMENTO DE REVESTIMENTO” apresentada no dia 30 de abril de 2021, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.



Orientadora:

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Joyce Batista Azevedo**  
SENAI CIMATEC

Coorientadora:

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Josiane Dantas Viana Barbosa**  
SENAI CIMATEC

Membro Interno:

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Larissa da Silva Paes Cardoso**  
SENAI CIMATEC

Membro Externo:

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tatianny Soares Alves**  
UFPI

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e esposa com gratidão por seus apoios, carinho e presença ao longo da elaboração do mesmo.

## **AGRADECIMENTOS**

Às Professoras Dr<sup>a</sup> Joyce Azevedo e Dr<sup>a</sup> Josiane Barbosa por toda orientação, difusão de conhecimento e disponibilidade constante. Vocês foram essenciais em todo processo.

À Prof. Dr<sup>a</sup> Pollyana Cardoso, que mesmo em um período crítico de pandemia não mediu esforços para dar seguimento aos experimentos, você foi o pilar de todo trabalho e seguramente sem a sua ajuda não teria conseguido.

À Prof. Dr<sup>a</sup> Bruna Machado, pela atenção e todo apoio durante o andamento da pesquisa.

Aos alunos de iniciação científica Matheus Moreira e Lorrane Silva da UFRB pelas contribuições e esforços no desenvolvimento dos experimentos.

Aos Professores do Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial do SENAI CIMATEC pela transmissão de conhecimento.

Ao SENAI CIMATEC e UFRB pela disponibilização dos laboratórios e recursos para realização do trabalho.

## RESUMO

A indústria da construção civil contribui fortemente para os elevados níveis de dióxido de carbono no planeta e por esse motivo o setor vem investindo no desenvolvimento de novos produtos que reduzam o impacto ambiental. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um compósito polimérico fibroso utilizando resíduos de fibras de tereftalato de polietileno (PET) para aplicação na construção civil como elemento de revestimento. Inicialmente foi efetuada uma prospecção tecnológica visando mapear o desenvolvimento de patentes relacionadas ao tema. Em seguida, realizou-se a caracterização física, térmica e morfológica da fibra, juntamente com a avaliação dos teores das mesmas nas propriedades mecânicas, morfológica, resistência química, resistência a radiação ultravioleta e absorção do compósito desenvolvido. Por fim, os resultados foram comparados a parâmetros pré-estabelecidos pelas normas NBR 15.575-3 e NBR 13.818. A prospecção tecnológica sugeriu aumento no desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas ao tema. As fibras PET apresentaram estabilidade térmica até aproximadamente 325,44°C e a sua adição em teor de 5% resultou em um aumento superior a 300% na resistência ao impacto, porém com redução da resistência à flexão. Os resultados dos ensaios de resistência mecânica, química e permeabilidade dos compósitos atenderam aos parâmetros estabelecidos pelas normas utilizadas no estudo. O ensaio com a câmera de degradação indicou que as fibras PET sofreram mais intensamente os efeitos da exposição aos raios UV em comparação a matriz polimérica.

Palavras-chave: Polímero; Compósito; Fibra PET; Resíduo Industrial; Revestimento; Construção Civil.

## **ABSTRACT**

The construction industry contributes strongly to the high levels of carbon dioxide on the planet and for this reason the sector has been investing in the development of new products that reduce the environmental impact. In this context, the present work had as objective the development of a fibrous polymeric composite using residues of polyethylene terephthalate (PET) fibers for application in civil construction as a coating element. Initially, a technological survey was carried out in order to map the development of patents related to the theme. Then, the physical, thermal and morphological characterization of the fiber was carried out, together with the evaluation of its contents in the mechanical, morphological properties, chemical resistance, resistance to ultraviolet radiation and absorption of the developed composite. Finally, the results were compared to parameters pre-established by the standards NBR 15.575-3 and NBR 13,818. Technological prospecting suggested an increase in the development of new technologies related to the theme. PET fibers showed thermal stability up to approximately 325.44 ° C and their addition in 5% content resulted in an increase of more than 300% in impact resistance, but with a reduction in flexural strength. The results of the mechanical, chemical and permeability tests of the composites met the parameters established by the standards used in the study. The degradation chamber test indicated that PET fibers suffered more intensely from the effects of exposure to UV rays compared to the polymeric matrix.

**Keywords:** Polymer; Composite; PET Fiber; Industrial Waste; Tile; Construction.

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Vida útil para placas cerâmicas em diferentes aplicações.</i>	29
<i>Tabela 2 – Ficha técnica da Resina de Poliéster Insaturado AROPOLTM L 50500.</i>	31
<i>Tabela 3 – Densidade da Fibra PET.</i>	44
<i>Tabela 4 – Avaliação visual da ocorrência de danos a superfície do revestimento conforme NBR 15575-3.</i>	54
<i>Tabela 5 – Grupos de absorção segundo resultados do ensaio de absorção de água.</i>	57
<i>Tabela 6 – Classificação das cerâmicas segundo resultados do ensaio de absorção de água.</i>	58

## LISTAS DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Esquema de classificação dos compósitos.</i>	20
<i>Figura 2 – Representação esquemática dos tipos de orientação e distribuição das fibras.</i>	25
<i>Figura 3 - Formação da resina poliéster: A - macromolécula de poliéster; B - ação dos catalisadores; C - interligação dos ácidos insaturados através dos monômeros de estireno.</i>	26
<i>Figura 4 – Fluxograma geral da pesquisa.</i>	30
<i>Figura 5 - Fibra PET utilizada como reforço.</i>	32
<i>Figura 6 - Fluxograma do processo de análise dos documentos.</i>	33
<i>Figura 7 - Preparação dos moldes de silicone.</i>	35
<i>Figura 8 – Processo de obtenção das amostras.</i>	36
<i>Figura 9 – Ensaio de resistência a flexão.</i>	36
<i>Figura 10 – Ensaio de resistência ao impacto.</i>	37
<i>Figura 11 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) utilizado no estudo de propriedade do Senai Cimatec.</i>	38
<i>Figura 12 – Ensaio de resistência química.</i>	38
<i>Figura 13 – Câmara de degradação utilizada no estudo de propriedade do Senai Cimatec.</i>	39
<i>Figura 14 – Evolução anual dos documentos depositados relacionados ao tema da pesquisa.</i>	41
<i>Figura 15 – Matriz da análise de patentes.</i>	42
<i>Figura 16 – Relação entre a aplicação da tecnologia e o setor pretendido: A – industrial; B – construção.</i>	43
<i>Figura 17 – Curva termogravimétrica da Fibra de PET.</i>	46
<i>Figura 18 – MEV da Fibra PET com aumento de: A - 700x; B - 27x.</i>	47
<i>Figura 19 – Resistência ao Impacto de Compósitos com Fibra de PET.</i>	47
<i>Figura 20 – Amostras com 5% de fibras PET descartadas por apresentarem falhas no processo de obtenção dos compósitos.</i>	48
<i>Figura 21 – Resultados das propriedades de flexão dos compósitos: A - Resistência a Flexão de compósitos com Fibra de PET; B - Módulo Elástico de compósitos com Fibra de PET.</i>	49
<i>Figura 22 – Exemplo genérico de um sistema de pisos e seus elementos.</i>	50
<i>Figura 23 – Microscopia Eletrônica de Varredura das superfícies dos compósitos: A – Imagem da superfície de fratura do polímero puro (PP) aumentada 30x; B – PP aumentada 500x.</i>	51
<i>Figura 24 – Microscopia Eletrônica de Varredura das superfícies dos compósitos: A – PET 1% aumentada 30x; B – PET 1% aumentada 500x.</i>	51
<i>Figura 25 – Microscopia Eletrônica de Varredura das superfícies dos compósitos: A – PET 3% aumentada 30x; B – PET 3% aumentada 200x.</i>	52
<i>Figura 26 – Microscopia Eletrônica de Varredura das superfícies dos compósitos: A – PET 5% aumentada 30x; B – PET 5% aumentada 200x.</i>	52
<i>Figura 27 – Ensaio de Resistência Química: A1 – Ensaio com amostras submetidas por 16h a café com concentração 120g/L; A2 – Resultado visual do ensaio com amostras submetidas a café; B1 – Ensaio com amostras expostas a detergente neutro da marca Ypê por 24 horas; B2 – Resultado visual do ensaio com amostras expostas a detergente neutro.</i>	53
<i>Figura 28 – A – Comparativo entre os espectros de absorção das amostras contento resina pura envelhecidas e não envelhecidas na câmara de degradação; Comparativo entre os espectros de absorção das amostras contento fibras PET 5% envelhecidas e não envelhecidas na câmara de degradação.</i>	56
<i>Figura 29 – Ensaio de absorção de água.</i>	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

J – joules

Mpa – megapascal

g - grama

cm<sup>3</sup> – centímetro cúbico

ml – mililitro

kN – kilonewton

mm – milímetro

°C – celsius

L – litro

m – massa

μm – micrômetro

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAP – acetil acetona

ANFACER – Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento

ASTM – American Society for Testing and Materials

BPO – peróxido de benzoila

CHP – hidroperóxido de cumeno

CO<sub>2</sub> – dióxido de carbono

COVID-19 – coronavirus disease 2019

FT-IR – espectroscopia no infravermelho

IFA - Institut für Arbeitsschutz

IPC – International Patents Classification

ISO – International Organization for Standardization

MEKP – peróxido de metil etil cetona

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PET – politereftalato de etileno

PVC – policloreto de vinila

SINDUSCON – Sindicato da Indústria da Construção

TGA – Termogravimétrica

UV – ultravioleta

WIPO – Organização Mundial da Propriedade Intelectual

## SUMÁRIO

RESUMO.....	I
ABSTRACT .....	II
LISTA DE TABELAS .....	III
LISTAS DE FIGURAS .....	IV
LISTA DE SÍMBOLOS .....	V
LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	VI
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS .....	17
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	17
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	17
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
<b>3.1 Compósitos</b> .....	19
<b>3.2 Fase Dispersa</b> .....	21
3.2.1 Compósitos Reforçados por Fibras.....	21
3.2.2 Reforço: Fibra de Politereftalato de Etileno (PET) .....	23
3.2.3 Influência da Orientação, Concentração e Distribuição das Fibras.....	24
<b>3.3 Fase Contínua</b> .....	25
3.3.1 Compósitos com Matriz Polimérica.....	25
3.3.2 Matriz: Resina Poliéster .....	26
<b>3.4 Aplicação do compósito polimérico fibroso como elemento de revestimento</b>	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
<b>4.1 Materiais</b> .....	30
4.1.1 Matriz Polimérica.....	30
4.1.2 Fibra Sintética .....	31
<b>4.2 Metodologia</b> .....	32
4.2.1 Prospecção Tecnológica .....	32
4.2.2 Caracterização Física da Fibra .....	33
4.2.3 Caracterização Térmica da Fibra .....	34
4.2.4 Caracterização Morfológica da Fibra.....	34
4.2.5 Obtenção dos Compósitos.....	34
4.2.6 Caracterização Mecânica dos Compósitos.....	36
4.2.7 Análise Morfológica dos Compósitos .....	37

4.2.8 Resistencia Química dos Compósitos .....	38
4.2.9 Exposição dos Compósitos à Radiação Ultravioleta .....	39
4.2.10 Absorção de Água pelo Compósito .....	39
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1 Prospecção Tecnológica.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2 Caracterização Física da Fibra.....</b>	<b>44</b>
<b>5.3 Caracterização Térmica da Fibra .....</b>	<b>45</b>
<b>5.4 Caracterização Morfológica da Fibra .....</b>	<b>46</b>
<b>5.5 Caracterização Mecânica dos Compósitos.....</b>	<b>47</b>
<b>5.6 Análise Morfológica dos Compósitos.....</b>	<b>50</b>
<b>5.7 Resistência Química dos Compósitos.....</b>	<b>53</b>
<b>5.8 Comportamento dos Compósitos a Exposição Ultravioleta .....</b>	<b>54</b>
<b>5.9 Absorção de Água pelo Compósito .....</b>	<b>57</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os níveis de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera tornam-se cada vez mais alarmantes ao longo dos anos devido a sua influência direta no processo de aquecimento global (MANJUNATH *et al.*, 2019). De acordo com Andrew (2018) em seu estudo sobre os níveis de emissões globais de CO<sub>2</sub> de 1928 a 2017 as emissões de Dióxido de Carbono provêm primordialmente de três fontes: combustíveis fósseis, desmatamento e decomposição de carbonatos.

A indústria da construção civil contribui fortemente para os elevados níveis de dióxido de carbono no planeta, a exemplo do cimento, que além de ser o produto mais consumido no setor, com uma produção anual de 4 bilhões de m<sup>3</sup>, é a maior fonte de emissão de CO<sub>2</sub> por decomposição de carbonatos do planeta. O material teve sua produção aumentada em mais de 30 vezes nos últimos 65 anos, com destaque para China que a partir de 1990 teve sua produção nacional aumentada em mais de 11 vezes e um volume produtivo 75% superior à média global. Estima-se que até 2060 o número de construções no planeta irá duplicar e atender a essa demanda global é o equivalente a reconstruir Nova York a cada 30 dias (ELLIS *et al.*, 2019; CHANDLER, 2019; HABERT *et al.*, 2020).

BILAL *et al.* (2020) ressaltam a importância do fomento e investimento por parte da indústria no desenvolvimento de novos produtos para construção civil que reduzam o impacto ambiental causado pelo setor e Lin *et al.* (2020) sugerem que os materiais compósitos constituídos por resíduos industriais podem ser excelentes alternativas para criação de novos produtos ecologicamente adequados e que contribuam com a diminuição da carga de detritos lançados no meio ambiente. Os compósitos são definidos como uma classe de material constituída por duas ou mais fases fisicamente e/ou quimicamente distintas, adequadamente arranjadas ou distribuídas e que possui características que não são apresentadas por nenhum de seus componentes isoladamente. Três itens determinam as características de um compósito: o reforço, a matriz e a interface entre eles. Esses materiais são classificados com base no tipo de matriz empregada (polímero, metal ou cerâmica) e reforços utilizados (partículas, fibras curtas, fibras contínuas ou laminar). Os Compósitos de matriz polimérica geralmente

utilizam como reforço fibras de carbono, vidro, aramida e poliéster, sendo que em muitas aplicações não estruturais são empregadas fibras naturais, tais como fibras de coco, juta, sisal e abacaxi (MEYERS e CHAWLA, 2008; NETO e PARDINI, 2016; MARINUCCI, 2011).

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um compósito polimérico fibroso a partir de resíduos industriais de fibras de politereftalato de etileno (PET) para aplicação na construção civil como elemento de revestimento. A NBR 15.575-3 (2013) define o elemento de revestimento como um componente de um sistema que pode ser horizontal ou vertical, destinado a cumprir função estrutural, de vedação e tráfego.

Um marco importante no incentivo às práticas de reciclagem pelo setor industrial ocorreu em 2015, quando a ONU (Organização das Nações Unidas) criou os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com a meta de implementar esses objetivos globalmente até 2030 (LU *et al.*, 2015). O presente trabalho atende a 6 desses objetivos (nº 9 – indústria, inovação e infraestrutura; nº 11 – cidades e comunidades sustentáveis; nº 12 – consumo e produção responsáveis; nº 13 – Ação contra a mudança global do clima; nº 14 – vida na água; nº 15 – vida terrestre), apresentando-se como um possível produto sustentável e que contribui positivamente para sociedade.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um compósito polimérico fibroso utilizando resíduos de fibras de PET para aplicação na construção civil como elemento de revestimento.

### **2.2 Objetivos específicos**

Especificamente, este trabalho propôs:

- Verificar o potencial de inovação do material através da realização de um estudo prospectivo;
- Caracterizar o resíduo de fibra de PET que irá compor o compósito;
- Avaliar a influência do tipo e concentração da fibra de PET nas propriedades mecânicas e físicas dos compósitos;
- Simular condições de intempéries e avaliar a degradação dos compósitos.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

A indústria polimérica estabeleceu-se na construção civil através de um processo de substituição de produtos estabelecidos no setor por versões constituídas por polímeros. São exemplos de polímeros amplamente utilizados no setor o policloreto de vinila, polietileno, poliamida, poliestireno, resina poliéster e resina epóxi (DE LIMA *et al.*, 2012).

- a) Policloreto de vinila (PVC) – Possui vasta aplicação no setor construtivo devido ao seu baixo custo e boa ductilidade, o material é comumente utilizado na fabricação de telhas, tubulações elétricas e hidrossanitárias (SHI *et al.*, 2019).
- b) Polietileno – Devido a sua flexibilidade, o polímero é utilizado majoritariamente na fabricação de lonas (BAUER, 2016), embora Olofinnade *et al.* (2020) tenham apresentado estudo com resultados significativos com a aplicação de resíduos desse material em concretos e blocos não estruturais.
- c) Poliamida (nylon) – A poliamida é empregada preferencialmente na fabricação de pequenas peças e acessórios como buchas, maçanetas, dobradiças e fechaduras (DE LIMA *et al.*, 2012; BAUER, 2016). Entretanto, Yin e Wu (2018), verificaram que a aplicação de resíduos industriais de poliamida em asfaltos, causou uma melhora significativa na estabilidade do material em altas temperaturas e um aumento expressivo da resistência mecânica em baixas temperaturas, além de redução na propagação de trincas.
- d) Poliestireno – Com boa resistência a agentes corrosivos, o poliestireno é outro caso de sucesso da implementação de materiais poliméricos no setor construtivo, o polímero é empregado intensamente na fabricação de conexões, assentos para vasos sanitários e bancos, enquanto que a sua versão expandida (poliestireno expandido), se apresenta no mercado sob a forma de esferas comprimidas em placas e possui aplicação na confecção de: lajes e forros (BAUER, 2016), isolamentos térmicos e acústicos (DEL RIO MERINO *et al.*, 2019), concretos leves (FERRÁNDIZ-MAS *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2015) e construção de pavimentos (MOHAJERANI *et al.*, 2017).
- e) Resina poliéster e epóxi – As resinas poliéster e epóxi possuem aplicações no setor da construção civil de cunho majoritariamente estrutural. Porém, a facilidade de fabricação, baixo custo e possibilidade de utilização como matriz na

criação de compósitos, fomenta desenvolvimento de novos estudos com o material (MEYERS e CHAWLA, 2008). As resinas estão presentes em estudos para aplicação no: reparo rápido de rodovias e pistas aeroportuárias (ROH *et al.*, 2015; JUNG *et al.*, 2015), confecção de consoles para linhas ferroviárias (JEON *et al.*, 2015), fabricação de assoalhos para pontes (MIOTTO e DIAS, 2015), manufatura de elementos para sistemas de drenagem (AN *et al.*, 2020), confecção de coberturas e fôrmas (BAUER, 2016). Entretanto, a restrição do uso de polímeros termofixos em ambientes com elevadas temperaturas é uma barreira a ser vencida para ampliação do uso do material. (XUE e QIAN, 2016; ELALAOUI *et al.* 2018).

A utilização destes materiais em aplicações na construção civil também é uma alternativa para redução do impacto ambiental causado pela geração dos elevados níveis de emissão de dióxido de carbono atrelado a este setor. Sendo assim, visando adequar requisitos ambientais e técnicos, verifica-se que os materiais compósitos possuem papel de destaque devido a possibilidade de incorporação de resíduos para o desenvolvimento de novos produtos sustentáveis (BILAL *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2019; LIN *et al.*, 2020).

No desenvolvimento dos compósitos é importante buscar alternativas de fibras como reforços para a produção de materiais que atendam aos requisitos técnicos da aplicação sugerida nesta proposta. Desta forma, utilizou-se um resíduo da indústria têxtil, as fibras sintéticas de politereftalato de etileno (PET). Os materiais compósitos, a resina poliéster e a fibra de politereftalato de etileno (PET) utilizada como reforço no estudo serão descritos mais profundamente nos tópicos a seguir.

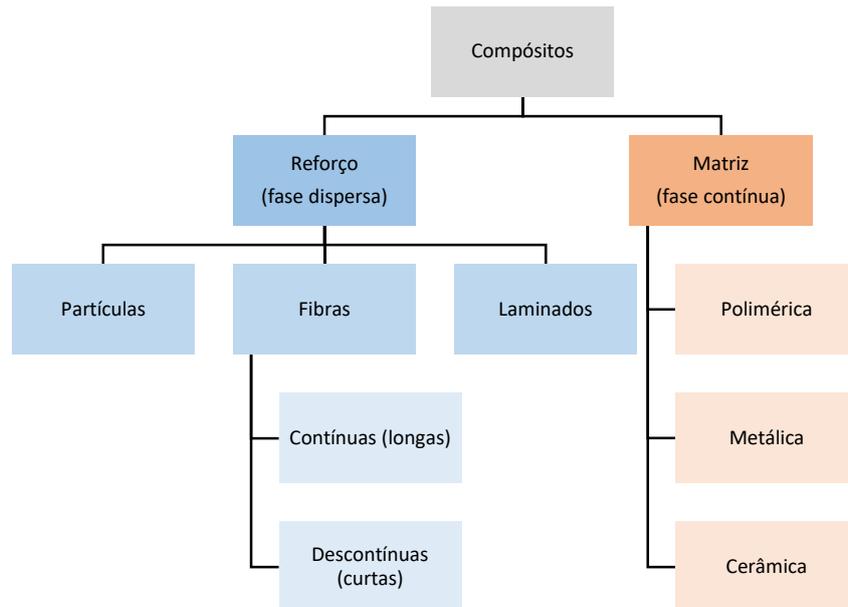
### **3.1 Compósitos**

Compósitos são materiais constituídos por duas ou mais fases na escala macroscópica, obtidos a partir da mistura de dois ou mais materiais diferentes, cujas propriedades mecânicas devem ser superiores às dos materiais constituintes. A fase contínua do material é chamada de matriz, enquanto a fase dispersa recebe o nome de reforço e a zona de interação entre estas duas fases é denominada de interface. Logo, as propriedades de um material compósito dependerão das características de seus

constituintes, da concentração relativa, das características da interface e da eficiência no processo de preparação e transformação (FAKIROV e HATTACHARYYA, 2007).

Como apresenta a Figura 1, os compósitos são classificados com base no tipo de matriz empregada: matriz polimérica, matriz metálica ou matriz cerâmica e com base no tipo de reforço utilizado: partículas, fibras ou laminados (MEYERS e CHAWLA, 2008).

Figura 1 – Esquema de classificação dos compósitos.



Fonte: Adaptado de MEYERS e CHAWLA, 2008

As propriedades dos compósitos possuem estreita relação com as características das fases constituintes, quantidades relativas e geometria da fase dispersa. Um dos parâmetros mais importantes na caracterização de um compósito é a relação matriz/reforço, pois a distribuição da estrutura determina a homogeneidade ou uniformidade do sistema. Quanto menos uniforme for a distribuição do reforço, mais heterogêneo é o material e maior é a variação das propriedades com consequente aumento na probabilidade de falhas em áreas mais fragilizadas.

As fases dos compósitos desempenham papéis diferentes e dependem do tipo e da aplicação de cada material. No caso de compósitos de baixo a médio desempenho, o reforço é geralmente utilizado na forma de fibras curtas ou partículas, as quais podem aumentar a dureza da material forma limitada, ao passo que a matriz, além de desempenhar a função de suporte para o reforço, rege as propriedades mecânicas do

material. Nos compósitos estruturais de alto desempenho, o reforço normalmente acontece por meio de fibras contínuas, essas fibras são consideradas a espinha dorsal do material e estabelecem as propriedades mecânicas do compósito de alto desempenho, enquanto que a matriz apenas adota uma função de proteção e suporte as fibras. Nos dois casos (compósitos de baixo a médio desempenho e compósitos estruturais de alto desempenho), a interface desempenha um papel importante no controle dos mecanismos de falha, tenacidade à fratura e no comportamento geral de tensão-deformação até a falha do material (DANIEL e ISHAI, 2006).

O tópico que se segue irá discursar sobre a fase dispersa (reforço) do compósito e mais especificamente sobre o reforço por meio de fibras sintéticas, que é o objeto do trabalho.

## **3.2 Fase Dispersa**

### **3.2.1 Compósitos Reforçados por Fibras**

Segundo Neto e Pardini (2016), tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa se apresenta na forma de fibras, projetos envolvendo compósitos reforçados com fibras buscam regularmente melhorias na relação resistência/peso do material, pois o mecanismo de reforço está associado à transferência de tensão da fibra para a matriz. Essas características são expressas através dos parâmetros resistência específica e módulo específico, os quais correspondem, respectivamente, às razões do limite de resistência à tração em relação à densidade relativa e ao módulo de elasticidade em relação a densidade relativa. Compósitos de matriz polimérica geralmente utilizam fibras sintéticas como a de carbono, vidro, aramida e poliéster, sendo que em muitas aplicações não estruturais são empregadas fibras naturais, tais como as de coco, juta, sisal e abacaxi (MARINUCCI, 2011).

As fibras sintéticas são as mais empregadas no setor da construção civil devido a sua excelente relação resistência/peso e baixa absorção de água, que é um dos maiores limitadores na utilização de fibras naturais (SABA *et al.*, 2015).

Marí *et al.* (2014) estudaram a aplicação um compósito reforçado com fibras de carbono na recuperação de estruturas preexistentes de concreto (vigas, pilares e lajes) e obtiveram um aumento significativo na resistência ao cisalhamento com a utilização

do material. O emprego de compósitos reforçados com fibras sintéticas em estruturas de aço também é apontado como opção por outros autores, porém, a ligação entre os elementos é uma questão crítica principalmente quando há um aumento significativo da temperatura e exposição prolongada a ambientes salinos (ZHAO *et al.*, 2014; BAI *et al.* 2014).

Fang *et al.* (2017) desenvolveram e investigaram uma plataforma para pontes composta por concreto armado e um compósito polimérico reforçado com fibras de carbono. Os resultados apontaram um aumento efetivo na rigidez das placas, o que sugere uma mitigação dos danos em sistemas tradicionais de pavimentação de asfalto e aparição de rachaduras nas placas, conforme comumente observado em pontes tradicionais.

Wang *et al.* (2019) realizaram estudo similar ao anterior, porém com um compósito reforçado com fibras de basalto aderido à parte externa das plataformas. As plataformas do estudo exibiram um excelente comportamento integrado, incluindo alta rigidez, alta capacidade de sobrecarga e ligações interfaciais confiáveis quando comparadas ao grupo controle. Ainda no tema da aplicação de compósitos reforçados por fibras sintéticas para o desenvolvimento de tecnologias para pontes.

Benmokrane *et al.* (2007) relatam o processo construtivo e os testes de carga ativa da ponte Val-Alain, a mesma está localizada no município de Val-Alain, Quebec – Canada e possui o primeiro tabuleiro de ponte do país composto somente por concreto e um compósito reforçado com fibras de vidro em forma de barras. Os testes de carga ativa demonstrados no estudo sugeriram que o uso do reforço não metálico em combinação com o concreto de alto desempenho indica uma vida útil superior a 75 anos.

Outras aplicações de compósitos reforçados por fibras sintéticas são encontradas na literatura, tais como a criação de estruturas constituídas pelo material com função de suporte em obras civis (YANG *et al.*, 2016), desenvolvimento de elementos como painéis e perfis para aplicação na construção de edifícios (KELLER, 2011; ZAFARI e MOTTRAM, 2015), construção de torres de transmissão compostas por resina termofixa e fibras de vidro (GODAT *et al.*, 2013) e confecção de estacas compostas por compósito reforçado com fibras sintéticas para utilização como componente de fundação na construção de edifícios (GUADES *et al.*, 2012).

### 3.2.2 Reforço: Fibra de Politereftalato de Etileno (PET)

O politereftalato de etileno é um poliéster formado pela reação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol, o polímero possui um grupo funcional éster na sua cadeia principal e detém propriedades termoplásticas, isto é, pode ser reprocessado diversas vezes pelo mesmo ou por outro processo de transformação. O material contém grande relevância no contexto industrial e é utilizado usualmente sob a forma de fibras no setor têxtil e como matéria prima para manufatura de embalagens (DE LUNA *et al*, 2020; ROMÃO *et al* 2009).

Entretanto, as fibras PET vêm adquirindo espaço na aplicação como componentes de reforço na construção civil. Dehghan e Modarres (2017), desenvolveram uma pesquisa para avaliar os efeitos da adição de resíduos industriais de fibras de tereftalato de polietileno nas propriedades de fadiga da mistura de asfalto quente. Os autores compararam com o grupo controle (sem adição de fibras) diferentes percentuais de concentração de fibras em relação ao peso de betume e obtiveram um aumento de 177% na vida à fadiga das amostras reforçadas com 2% de fibras. Usman *et al.* (2020), desenvolveram um estudo similar ao anterior, entretanto os pesquisadores expuseram metade das amostras à radiação gama e obtiveram uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas e térmicas do material em comparação ao grupo controle.

Mohammed e Rahim (2020) realizaram estudo com a adição de diferentes volumes de resíduos de fibras PET em concreto de alta resistência na fabricação de vigas. Os autores verificaram que a adição das fibras diminuiu significativamente a aparição de fissuras na estrutura, porém sem aumento significativo na capacidade de carga.

Al-hadithi *et al.* (2019) estudaram o comportamento de um concreto verde reforçado com resíduos de fibras de polietileno tereftalato para fabricação de lajes. Os experimentos apontaram que a inclusão de fibras PET aumentaram significativamente a resistência à compressão, flexão e impacto da estrutura.

Zhu *et al.*, (2018) desenvolveram e investigaram o comportamento à flexão de um painel sanduíche de polímero reforçado com fibra sintética para aplicação em edifícios. Os painéis eram compostos por um núcleo de madeira, envolto por polímero

e reforçado com tela de fibra de vidro em diferentes dimensões, os painéis foram fabricados por um processo de infusão de resina assistida a vácuo e as amostras foram carregadas sob flexão de quatro pontos para avaliar a resistência mecânica de cada espécime. Os resultados apontaram que os painéis com núcleo de 15mm e reforçados com as telas de fibra com espessura de 9 mm obtiveram a melhor relação peso/resistência.

Diante do que foi descrito acima, é possível apontar o potencial tecnológico das fibras PET no desenvolvimento de compósitos voltados para aplicação no setor da construção.

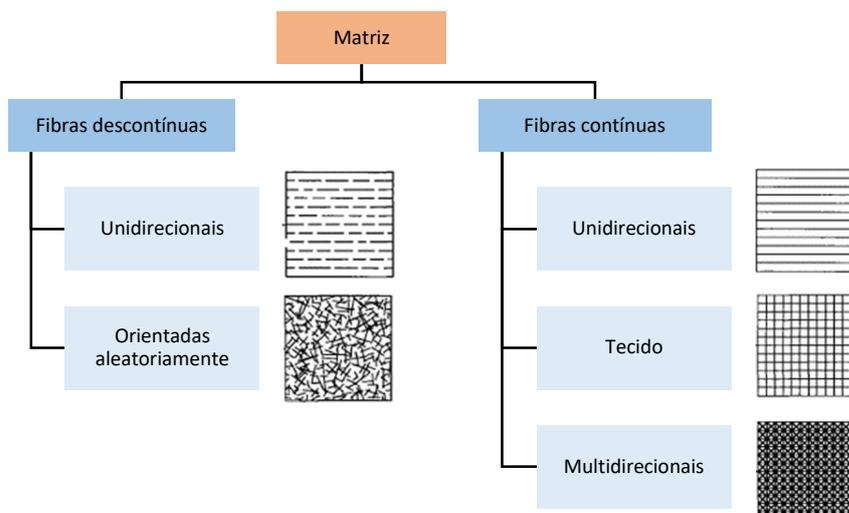
### 3.2.3 Influência da Orientação, Concentração e Distribuição das Fibras

A orientação, concentração e distribuição das fibras têm influência significativa sobre a resistência e sobre outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras (CHAWLA, 2012).

Compósitos com fibras descontínuas contêm fibras curtas, nanotubos ou whiskers como fase de reforço e podem estar orientadas ao longo de uma direção (unidirecionais) ou dispostas de forma aleatória. No caso das fibras unidirecionais, o material compósito tende a ser marcadamente anisotrópico (as características físicas do material variam com a direção da carga aplicada), ou mais especificamente ortotrópico, enquanto que os compósitos constituídos por fibras dispostas de forma aleatória, podem ser considerados isotrópicos e um exemplo disso são os compósitos reforçados com nanotubos de carbono (MEYERS e CHAWLA, 2008).

Em contrapartida, os compósitos com fibras contínuas (fibras longas), são os mais eficientes com relação a resistência a tensão. As fibras contínuas podem ser todas paralelas (unidirecionais), orientadas em ângulos retos entre si (tecido) ou orientadas ao longo de várias direções (multidirecionais). Os compósitos com fibras contínuas dispostas de forma multidirecional podem ser considerados como materiais isotrópicos (CHAWLA, 2012). A Figura 2 exibe uma representação esquemática dos tipos de fibras utilizadas como reforço em compósitos e suas diferentes formas de orientação e distribuição ao longo do material.

Figura 2 – Representação esquemática dos tipos de orientação e distribuição das fibras.



Fonte: Adaptado de DANIEL e ISHAI, 2006.

### 3.3 Fase Contínua

#### 3.3.1 Compósitos com Matriz Polimérica

A matriz possui algumas funções nos materiais compósitos, dentre elas: atuar como componente de ligação entre as fibras; meio de distribuição das tensões; meio de proteção as fibras contra danos como abrasões mecânicas e agentes químicos e agir como barreira para propagação de trincas. É importante que as forças de ligação entre a fibra e matriz sejam adequadas, a escolha de uma combinação matriz-fibra influencia na resistência final do compósito (NETO e PARDINI, 2016; MARINUCCI, 2011).

Compósitos com matrizes poliméricas são habitualmente constituídos por resinas termofixas e a escolha desses materiais são fomentadas pelas excelentes propriedades mecânicas apresentadas à temperatura ambiente, facilidade na fabricação e baixo custo. Entretanto, frequentemente as matrizes poliméricas termoplásticas determinam a máxima temperatura de serviço, uma vez que as mesmas normalmente fundem a uma temperatura inferior a fibra utilizada como reforço (MEYERS e CHAWLA, 2008)

As resinas poliméricas mais utilizadas devido ao baixo custo são os poliésteres e os vinis ésteres, aplicados usualmente para compor compósitos reforçados com fibras de vidro e o grande número de formulações destas resinas encontradas no mercado proporciona uma ampla variedade de propriedades para esses polímeros. As resinas

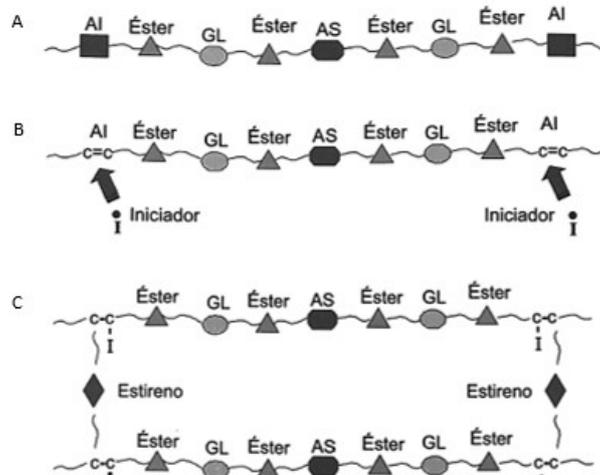
epóxi possuem preços mais elevados e além das aplicações comerciais, são empregadas em materiais aeroespaciais, esses polímeros possuem melhores propriedades mecânicas e melhor resistência à umidade do que os poliésteres e resinas vinílicas. Em caso de aplicações com temperaturas de serviço elevadas, as poliamidas são as mais utilizadas e seu limite superior de temperatura para utilização em regime contínuo é de aproximadamente 230 °C (DANIEL e ISHAI, 2006).

Devido ao menor custo quando comparada com as demais, fácil acesso e possível compatibilidade com as fibras PET, a resina poliéster foi escolhida como componente da matriz polimérica do estudo, no tópico a seguir será descrito as características físicas e químicas desse material.

### 3.3.2 Matriz: Resina Poliéster

Segundo Marinucci (2011), as resinas de poliéster são as mais utilizadas na produção de compósitos poliméricos por conciliarem desempenho e custo. O material apresenta boas propriedades mecânicas, ampla variedade de formulações e são compostas por uma base polimérica obtida de uma reação de esterificação entre ácidos saturados (ortoftálico ou isoftálico) e ácidos insaturados (anidrido maleico ou ácido fumárico), além da adição de glicóis e geralmente um monômero de estireno. A Figura 3 apresenta de forma esquemática a formação da resina poliéster.

Figura 3 - Formação da resina poliéster: A - macromolécula de poliéster; B - ação dos catalisadores; C - interligação dos ácidos insaturados através dos monômeros de estireno.



Fonte: MARINUCCI, 2011

De forma resumida, Neto e Pardini (2016) descrevem a função de cada componente como:

- Ácido saturado proporciona o espaçamento entre as moléculas ao longo da cadeia e de acordo com o tipo utilizado produz uma resina poliéster do tipo ortoftálica ou isoftálica;
- Ácido insaturado fornece os pontos reativos para as ligações cruzadas, o que irá determinar a rigidez da peça final;
- Glicol disponibiliza os grupos terminais para a reação de esterificação com os ácidos e controla também o comprimento da cadeia molecular;
- Monômero de estireno fornece os pontos reativos que formarão pontes com os ácidos insaturados durante a polimerização, permitindo que o polímero atinja suas propriedades mecânicas ideais.

A reação de cura e formação da resina poliéster acontece pela formação de um arranjo tridimensional nas ligações moleculares devido ao rompimento das insaturações presentes nos átomos de carbono dos ácidos insaturados. Essas insaturações são muito reativas e podem ser facilmente rompidas por radicais livres formados pelos iniciadores de cura (catalisadores) adicionados durante o preparo para fabricação de um compósito. Os iniciadores de cura a frio normalmente utilizados são: hidroperóxido de cumeno (CHP), peróxido de metil etil cetona (MEKP), peróxido de benzoila (BPO) e o acetil acetona (AAP). Durante o processo de cura há uma grande liberação de calor, acarretando em um aquecimento substancial da massa que está sendo polimerizada, podendo provocar contração da matriz polimérica e alteração da peça fabricada (MARINUCCI, 2011).

Apesar deste trabalho tratar de um estudo preliminar sobre o uso da fibra de PET em compósitos para possíveis aplicações na construção civil, entende-se que o desenvolvimento de um novo produto deve levar em consideração normas relacionadas ao setor e seus respectivos parâmetros laboratoriais.

### **3.4 Aplicação do compósito polimérico fibroso como elemento de revestimento**

Embora não exista uma norma específica para aplicação de compósitos poliméricos fibrosos como elementos de revestimento no setor da construção civil, as

normas NBR 13818 (baseada na ISO 13006 e ISO 10545) e a NBR 15575-3, voltadas para aplicação de placas cerâmicas como elementos de revestimento no setor da construção, atuam como norteadoras para especificação de parâmetros laboratoriais.

A NBR 13818 (1997) contempla o ensaio de resistência ao impacto e informa que cada fabricante deverá testar o seu produto em relação a dita característica e expor ao consumidor esses dados. A NBR 15575-3 (2013) informa que a resistência ao impacto visa simular choques acidentais gerados durante a utilização dos elementos na edificação e complementa que impactos com maiores energias se referem ao estado limite último, caracterizado pelo risco de colapso ou ruína do sistema, já os impactos de menores energias, referem-se ao estado limite de serviço ou utilização, caracterizado pela presença de fissuras e outras falhas. A norma ainda estabelece critérios mínimos de atendimento para pisos, como a não fratura do material a impactos com até 30 J, embora permita falhas superficiais (mossas, fissuras e desagregações) e resistência a impactos de 3,75 J quando utilizados como revestimentos verticais.

Com relação aos parâmetros para ensaios de flexão, a norma de desempenho NBR 15.575-3 (2013) estabelece que os revestimentos devem resistir a cargas verticais previsíveis nas condições normais de serviço, sem apresentar ruína, danos localizados ou deslocamentos excessivos. O documento determina que os sistemas de piso não devem apresentar ruptura ou qualquer outro dano quando submetido a cargas verticais concentradas de 1 kN/m<sup>2</sup> (10 Mpa) aplicadas no ponto mais desfavorável.

O ensaio de absorção de água está relacionado com a porosidade e com a densificação do material, ou seja, quanto menor a absorção de água, menor a sua porosidade e maior a sua densificação. O conhecimento da absorção de água é útil para determinação do uso de cada material, sendo cinco os grupos de absorção de água (Ia, Ib, IIa, IIb, III) estabelecidos pela NBR 13818 e os valores variam entre 0% a 10% de absorção (ANFACER, 2016).

O ensaio de verificação da resistência ao ataque de componentes químicos, consiste na exposição de um corpo-de-prova a soluções padronizadas que simulem a ação de produtos domésticos de limpeza e de agentes químicos normalmente utilizados na edificação, seguido da avaliação visual da ocorrência de danos a superfície do revestimento. O efeito dos agentes químicos sobre a amostra é expresso conforme a seguinte classificação, considerando-se o pior resultado: a) nível 4 = nenhuma alteração

visível; b) nível 3 = leve a moderada alteração de brilho e/ou cor, visível em qualquer ângulo de observação; c) nível 2 = severa alteração de brilho e/ou cor, mas sem ataque da superfície; d) nível 1 = ataque da superfície na forma de rachaduras, fissuras ou bolhas (NBR 15.575-3, 2013).

Segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento (2016), a durabilidade de uma edificação e seus sistemas, elementos e componentes é um requisito econômico do usuário, pois está associado ao custo do imóvel e a durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de atender às funções que lhe foram atribuídas, ou seja, há o comprometimento do seu desempenho. A NBR 15575-3 (2013), estabelece o período de tempo estimado de vida útil para as placas cerâmicas segundo sua aplicação como mostra a Tabela 1. A norma ainda relata que decorridos 50% da vida útil mínima sem a ocorrência de manutenções preventivas e/ou corretivas conforme determinado no Manual de Uso, Operação e Manutenção, considera-se atendido este requisito.

Tabela 1 – Vida útil para placas cerâmicas em diferentes aplicações.

Parte da edificação	Aplicação	Vida útil (anos)		
		Mínimo	Intermediário	Superior
Revestimento interno aderido	Revestimento de pisos, paredes e tetos	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Revestimento de fachada aderido e não aderido	Revestimento, molduras e componentes decorativos	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Piso externo	Revestimento de piso aderido ou elevado	≥ 13	≥ 17	≥ 20

Fonte: NBR 15575-3, 2013 *apud* ANFACER, 2016.

Frente ao que foi descrito, o trabalho tem como proposta desenvolver um compósito polimérico fibroso utilizando resíduos de fibras de PET, além de caracterizá-lo física e quimicamente, comparando os resultados com parâmetros pré-estabelecidos pela NBR 15575-3 e NBR 13818, ambas voltas para revestimentos cerâmicos aplicados a construção civil.

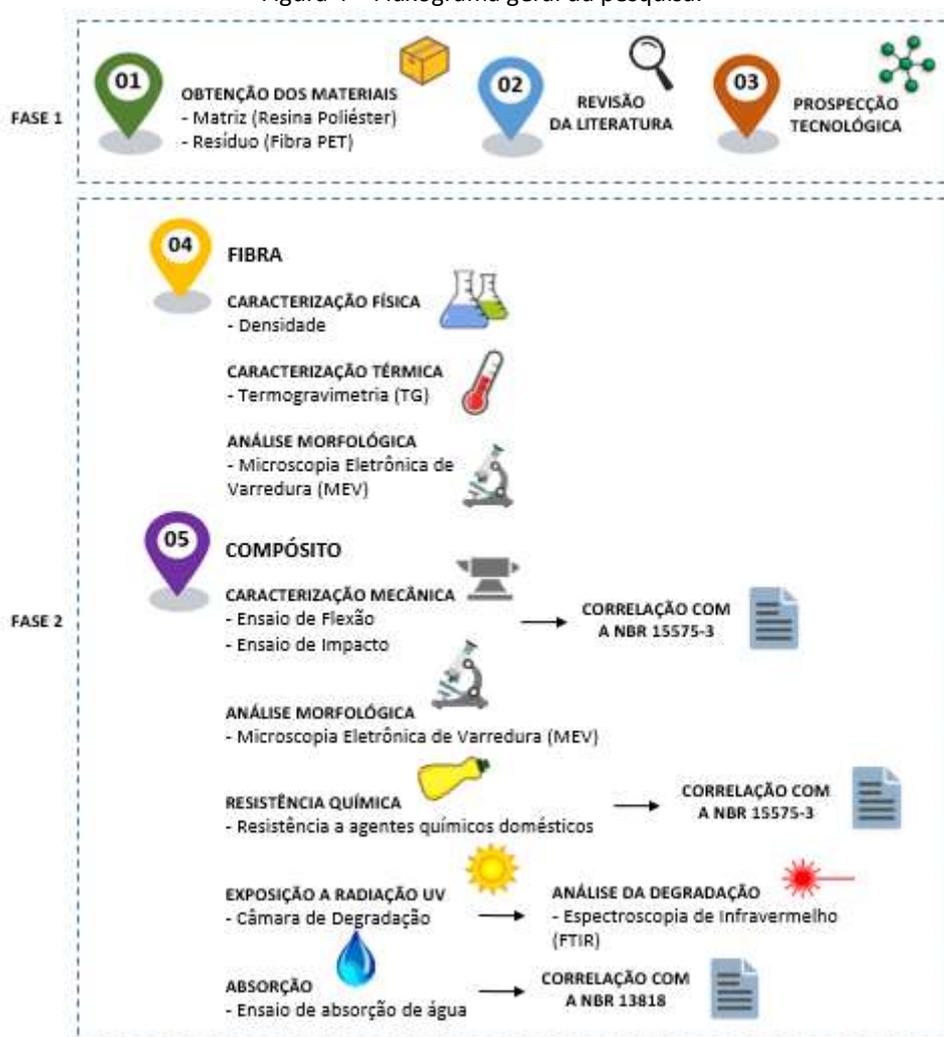
#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura acerca de trabalhos e normas tocantes ao tema de pesquisa, com intuito de delinear os experimentos e obter

parâmetros para análise dos resultados laboratoriais. Na sequência, foi executada uma prospecção tecnológica relacionada ao tema, que consiste em uma pesquisa sistemática nos bancos internacionais de patentes, com o objetivo de mapear tendências em tecnologias industriais e campos para o desenvolvimento de novas tecnologias.

Após o término da fase inicial, foi desenvolvida a etapa de experimentos, onde foram avaliadas as características físicas, térmicas e morfológicas das fibras, além de propriedades mecânicas, morfológicas, de resistências química, durabilidade e absorção de água do compósito propriamente dito. A Figura 4 apresenta um resumo das etapas efetuadas no estudo.

Figura 4 – Fluxograma geral da pesquisa.



Fonte: Autor

## 4.1 Materiais

### 4.1.1 Matriz Polimérica

Como matriz polimérica foi utilizada a Resina de Poliéster Insaturado AROPOLTM L 50500, em função da facilidade de manuseio e das propriedades mecânicas

apresentadas na Tabela 2 a partir dos dados fornecidos pelo fabricante. A AROP OLTM L 50500 é uma resina acelerada, tixotrópica e de baixa viscosidade, indicada para fabricação de peças em compósitos por moldagem aberta, via processos Hand Lay Up e Spray Up. Esta resina curada e sem reforço apresenta as seguintes propriedades mecânicas: 48 MPa de resistência à tração, 1,5% de alongamento, 70 MPa de resistência à flexão e 3,4 GPa de módulo de elasticidade.

Tabela 2 – Ficha técnica da Resina de Poliéster Insaturado AROPOLTM L 50500.

	Propriedades	Unidade	Valor	
Propriedades típicas da resina líquida	Gel Time (1,00g MEKP / 100g resina) a 25° C	minutos	10 - 15	
	Intervalo de pico exotérmico	minutos	8 - 12	
	Pico exotérmico	°C	180 a 190	
	Viscosidade Brookfield a 25°C	cP	250 - 350	
	Tixotropia	minutos	1,3	
	Teor de sólidos	%	55 - 57	
	Propriedades	Unidade	Valor	Método
Propriedades Mecânicas da Resina Curada sem Reforço	Resistência à tração	MPa	48	ASTM D 638
	Módulo na tração	MPa	3400	ASTM D 638
	Alongamento	%	1,5	ASTM D 638
	Resistência a flexão	MPa	70	ASTM D 790
	Módulo de flexão	MPa	3400	ASTM D 790
	HDT	°C	70	ASTM D 648
	Dureza Barcol		35	ASTM D 2583

\*Cura = 24 horas a 25°C e pós-cura de 2 horas a 80°C

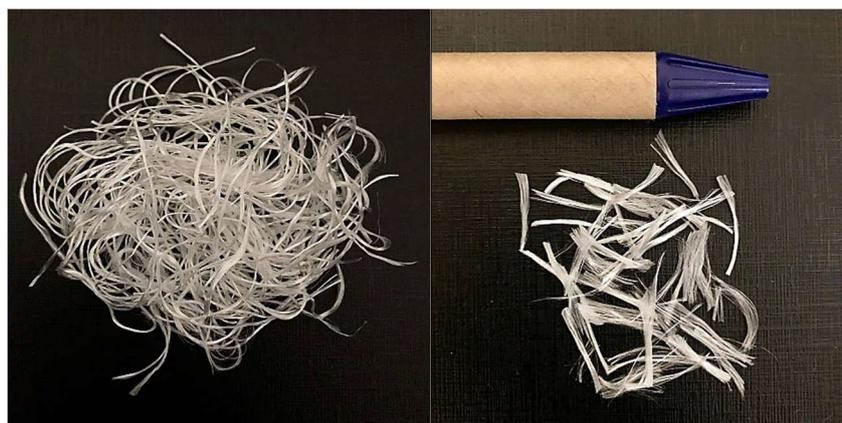
Fonte: Centerglass Resinas & Fibras de Vidro

Como agente de cura foi utilizado 1,00g do catalisador BRASNOX® DM-50, um peróxido de metil etil cetona (MEKP) em dimetilftalato para cada 100g de resina poliéster, como recomendado pelo fabricante.

#### 4.1.2 Fibra Sintética

A fibra PET utilizada no estudo foi cedida pela unidade baiana da multinacional Kordsa Global localizada no Polo Industrial de Camaçari. O material fornecido é um resíduo gerado durante processo de fabricação de filamentos para o reforço de pneus automotivos, com volume de produção aproximado de aproximadamente 142 Kg/ano, segundo a companhia. As fibras utilizadas no estudo foram cortadas de forma manual com comprimento médio de 1,1 cm ( $\pm 0,3$  cm) como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Fibra PET utilizada como reforço



Fonte: Autor

## 4.2 Metodologia

### 4.2.1 Prospecção Tecnológica

A realização da prospecção tecnológica foi realizada por meio de uma pesquisa sistemática na base de dados da Derwent Innovation Index (licença de uso do Centro Universitário SENAI CIMATEC - Salvador, Bahia, Brasil), uma plataforma que compila todos os bancos de documentos de patente disponíveis mundialmente. A busca foi realizada por meio das palavras-chave selecionadas nos títulos, resumos, relatórios descritivos e reivindicações dos documentos. Para coleta na base de dados foram utilizadas combinações das palavras-chave “composite”, “polymer”, “synthetic fiber” e “floor” e “tile”. No caso de pesquisas envolvendo documentos de patente, recomenda-se que a escolha das palavras-chave não seja específica, pois usualmente os redatores dos documentos tendem a utilizar na descrição da tecnologia palavras mais abrangentes como forma de ampliar a cobertura de proteção do invento.

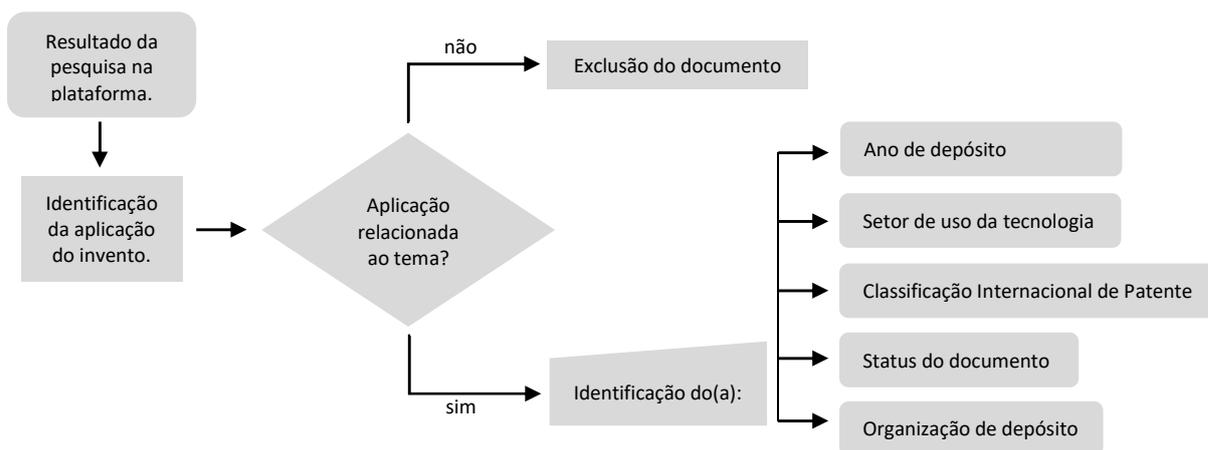
A coleta de dados ocorreu em junho de 2020 e todas as patentes relacionadas ao assunto foram revisadas. No entanto, é importante destacar que a Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO) determina que todos os documentos passem por um período de confidencialidade de 18 meses antes da publicação (TRIPPE, 2015).

Para interpretar as informações sobre a tecnologia protegida, cada documento foi analisado e as informações relevantes que descrevem a invenção foram extraídas e discutidas. A Figura 6 apresenta um fluxograma do método utilizado para a análise dos documentos. Após a análise foi possível identificar a aplicação da tecnologia, ano de

depósito do documento no país de origem, a classificação internacional de patentes pertencente, status do documento e organização de depósito.

O termo "documento de patente" inclui pedidos de patentes publicados, bem como patentes concedidas, expiradas ou depositadas.

Figura 6 - Fluxograma do processo de análise dos documentos.



Fonte: Autor

#### 4.2.2 Caracterização Física da Fibra

A densidade da fibra foi determinada segundo metodologia descrita por César *et al* (2004), sendo escolhida em função da simplicidade do procedimento e por não exigir grandes recursos. O procedimento consistiu na pesagem de aproximadamente 5g do material em balança analítica da marca *Gehaka*, modelo *BK 6000 II*. Posteriormente, foram utilizadas 5 provetas graduadas de 50 ml com erro associado de  $\pm 0,05$  e adicionada água destilada até o nível de 35 ml. Em seguida, as amostras foram introduzidas nas provetas até o ponto em que ficassem totalmente submersas e após intervalo de 3 minutos, para que parte das bolhas presentes na água ascendessem, foi aferido o volume obtido. A densidade do material foi obtida através da equação (1):

$$Densidade (g/cm^3) = \frac{Massa}{(Volume\ inicial - Volume\ final)} \quad \text{Equação (1)}$$

#### 4.2.3 Caracterização Térmica da Fibra

Para avaliação do limite da estabilidade térmica da fibra sintética foi realizada a análise Termogravimétrica (TGA) do material em equipamento da marca TA Instruments, modelo Q10, com taxa de aquecimento de 10°C/min e atmosfera de nitrogênio com vazão do gás de 100 ml/min. O procedimento ocorreu com a utilização de cadinho de platina e uma faixa de temperatura entre 25 a 800°C seguindo os critérios da norma internacional ASTM D6370.

#### 4.2.4 Caracterização Morfológica da Fibra

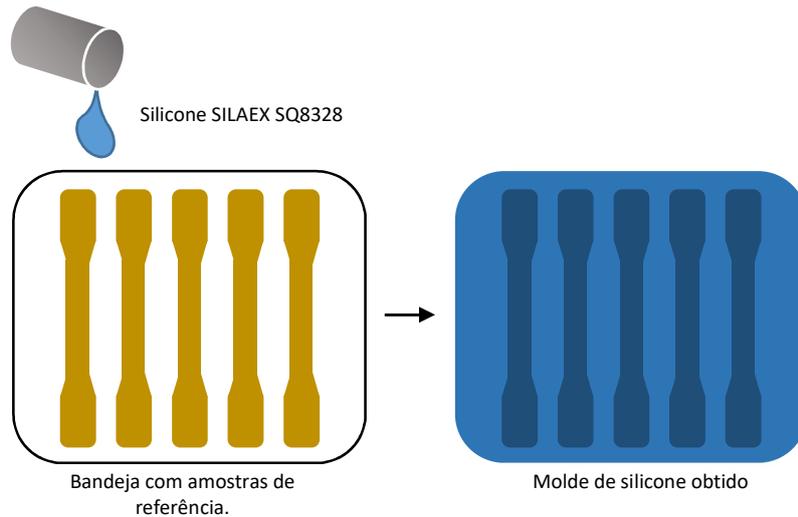
A morfologia das fibras foi estudada neste trabalho visando avaliar a possibilidade de ancoramento mecânico, influenciado pela superfície das mesmas. A análise morfológica da fibra PET foi realizada via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) a partir do processo de deposição de carbono na superfície da amostra em equipamento da marca Denton Vacuum modelo Desk V com o equipamento auxiliar Carbon Yarn Accessor, também da Denton Vacuum. A microscopia eletrônica de varredura foi realizada em equipamento da marca Jeol e modelo JSM-6510 LV.

#### 4.2.5 Obtenção dos Compósitos

- Obtenção dos Moldes

Foi utilizado o silicone SILAEX SQ8328, que é um silicone líquido bicomponente de cura a frio. Este silicone apresenta baixa viscosidade, preenchendo com fidelidade os detalhes dos objetos a serem copiados, conferindo bom acabamento das peças moldadas. O molde de silicone para confecção dos corpos de prova foi fabricado com base no trabalho de Pereira *et al.* (2019), a partir de amostras de referência com as dimensões requeridas pela norma padrão ISO 178. Em uma bandeja polimérica foram depositadas amostras de referência e sobre as mesmas foi vertido o silicone para a formação dos respectivos moldes, respeitando o tempo de cura de 72h como demonstra a Figura 7.

Figura 7 - Preparação dos moldes de silicone.



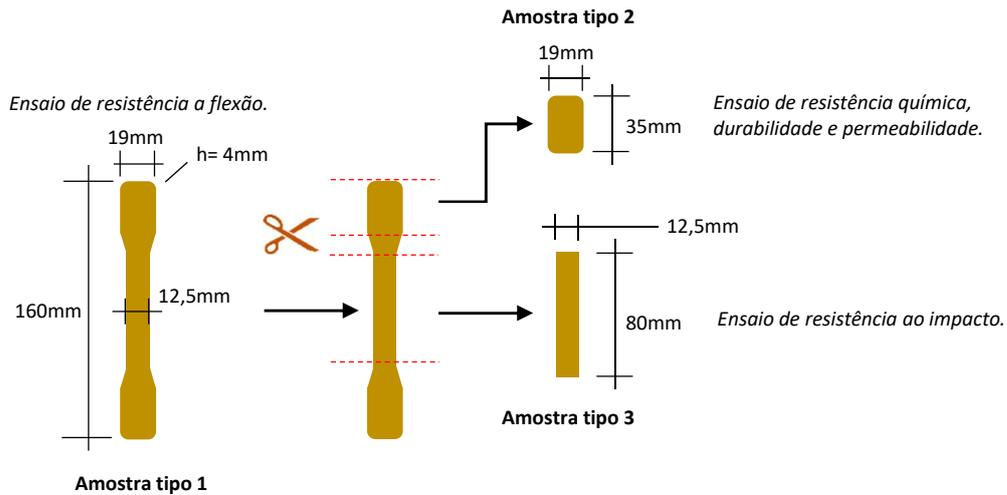
Fonte: Adaptado de PEREIRA *et al.*, 2019.

- Obtenção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram produzidos em molde de silicone seguindo as dimensões exigidas pela norma padrão ISO 178. Os compósitos foram misturados de forma manual com 1, 3 e 5% do peso constituído por fibras. Esses percentuais foram definidos por observações experimentais, pois concentrações maiores inviabilizariam a moldagem dos corpos de prova no molde utilizado. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram expostos ao ar por 24 horas para que o processo de cura da resina fosse concluído. Em seguida, os espécimes foram separados, armazenados e catalogados de acordo com as composições. Corpos de prova contendo resina pura também foram confeccionados para comparação durante a caracterização mecânica. A Figura 8 demonstra o processo de obtenção das amostras para os ensaios a partir do molde obtido de silicone.

- a) Amostra tipo 1 – usada no ensaio de resistência a flexão.
- b) Amostra tipo 2 – usada nos ensaios de resistência química, durabilidade e permeabilidade.
- c) Amostra tipo 3 – usada no ensaio de resistência ao impacto.

Figura 8 – Processo de obtenção das amostras.



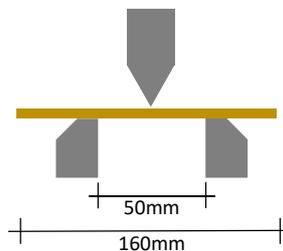
#### 4.2.6 Caracterização Mecânica dos Compósitos

Para avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos obtidos com as diferentes formulações de fibras foram realizados ensaios mecânicos de flexão em três pontos e resistência ao impacto. Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do SENAI CIMATEC.

- Ensaio de Resistência a Flexão

Foi realizado o ensaio de flexão em três pontos de acordo com a ISO 178 em máquina de ensaios universal da marca EMIC, modelo DL 2000, com uma célula de carga de 50 kN a uma taxa de deflexão de 2mm/min e distância total entre os apoios de 50 mm como apresenta a Figura 9. Os resultados obtidos correspondem à média de 05 amostras ensaiadas, sendo os resultados processados no Software Tesc.

Figura 9 – Ensaio de resistência a flexão.

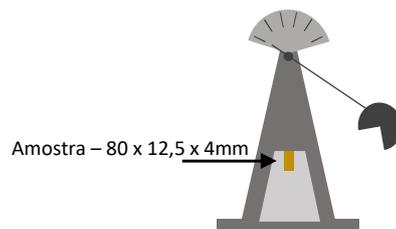


Fonte: Autor

- Ensaio de Resistência ao Impacto

Para determinar a resistência ao impacto foi utilizada uma máquina Instron, modelo CEAST 9050, com martelo 2.7 J e configuração IZOD, sem entalhe, seguindo a norma padrão ISO 180 como apresenta a Figura 10. Foram utilizadas 5 amostras para cada composição com 80mm de comprimento, 12,5mm de largura e 4mm de altura.

Figura 10 – Ensaio de resistência ao impacto.



Fonte: Autor

#### 4.2.7 Análise Morfológica dos Compósitos

A análise morfológica da superfície de fratura do compósito foi realizada via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com o objetivo de avaliar a adesão polímero/fibra, que é um dos principais fatores para determinação das propriedades mecânicas dos compósitos, e determinar o tipo de fratura sofrida pela amostra, diferenciando fraturas dúcteis de frágeis, além de elencar diversos fatores que podem ter causado a falha do material. Para a realização da análise, a superfície foi submetida a um processo de deposição de carbono em equipamento Denton Vacuum modelo Desk V. A Microscopia Eletrônica de Varredura (Figura 11) foi realizada com o equipamento da marca Jeol modelo JSM-6510 LV de propriedade do Senai Cimatec.

Figura 11 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) utilizado no estudo de propriedade do Senai Cimatec.

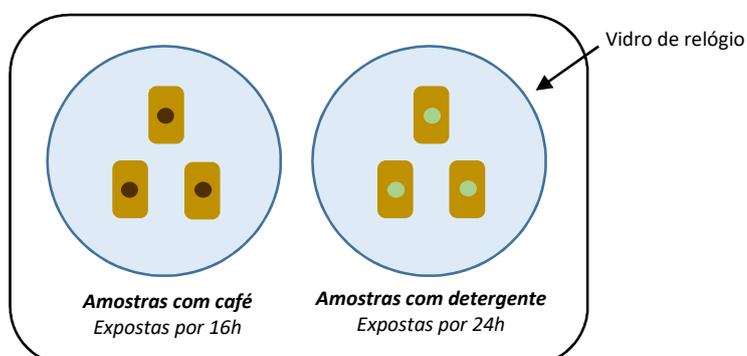


Fonte: Autor

#### 4.2.8 Resistencia Química dos Compósitos

O ensaio de resistência química do compósito foi baseado na NBR 15575-3 que preconiza a simulação de produtos domésticos de limpeza e de agentes químicos normalmente utilizados na edificação, seguido da avaliação visual da ocorrência de danos a superfície do revestimento. Foram selecionadas 6 amostras com a concentração de fibras que obtiveram os melhores resultados nos ensaios de impacto e flexão. Metade das amostras foi exposta por 16h a café com concentração 120g/L e a outra contendo detergente neutro por 24 horas, conforme Figura 12.

Figura 12 – Ensaio de resistência química.



Fonte: Autor

#### 4.2.9 Exposição dos Compósitos à Radiação Ultravioleta

O efeito da radiação ultravioleta (UV) sobre os compósitos foi avaliado por meio de ensaio em câmara de degradação (Figura 13). Para realização do ensaio foram selecionadas 2 amostras contendo somente resina poliéster e 2 amostras da formulação que obteve os melhores resultados mecânicos, sendo as mesmas submetidas a um ciclo de 8 horas de radiação sob temperatura de 70°C e por 4 horas de condensação a 50°C durante 30 dias. O ensaio foi realizado em equipamento da marca BASS UUV/2009, com lâmpadas UVA-351, seguindo a norma ASTM G154 – 12.

Após o período de exposição em câmara de envelhecimento acelerado, as amostras foram avaliadas por meio de espectroscopia no infravermelho (FT-IR) para verificação de alterações químicas em função das condições de degradação impostas. Para análise FT-IR foi utilizado equipamento da Thermo scientific- Nicolet iS 10 por transformada de Fourier conforme norma internacional ASTM E1252 com leitura entre 400 e 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

Figura 13 – Câmara de degradação utilizada no estudo de propriedade do Senai Cimatec.



Fonte: Autor

#### 4.2.10 Absorção de Água pelo Compósito

O ensaio de absorção de água seguiu os parâmetros da norma padrão ISO 62. Inicialmente, as amostras foram secas em 50° C por 24h em estufa. Os espécimes foram

pesados em uma balança analítica da marca *Gehaka* modelo *BK 6000 II* e imerso em copos contendo água destilada. Em intervalos de tempo (24h, 48h, 120h, 144h e 168h) as amostras foram removidas dos recipientes com água, pesadas e colocada de volta nos copos. Este procedimento foi repetido até que a saturação no peso medido fosse alcançada conforme a equação (2):

$$\text{Absorção de água (\%)} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad \text{Equação (2)}$$

$m_2$  = massa da amostra antes da imersão

$m_1$  = massa da amostra após imersão

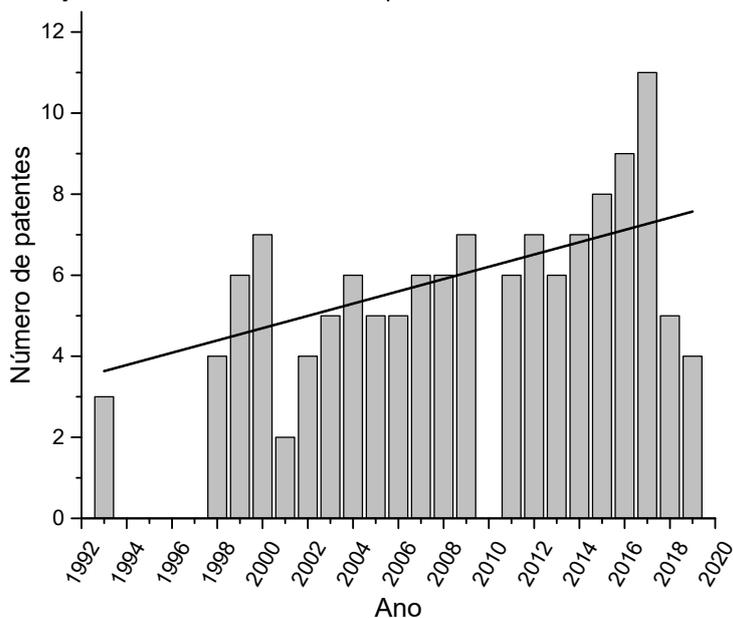
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Prospecção Tecnológica

Foram identificados 129 documentos na base de dados do Derwent Innovation Index relacionados com a área de investigação de interesse. Foi possível verificar a evolução histórica da tecnologia pesquisada, os principais países detentores de registros, os principais cessionários/requerentes, os códigos internacionais de classificação de patentes mais relevantes e identificar o status das patentes.

A Figura 14 apresenta a evolução anual dos documentos depositados relacionados ao tema da pesquisa. O maior número de publicações ocorreu em 2017, o que representou 7,7% do total, porém devido ao período de sigilo, é importante destacar que os anos de 2018, 2019 e 2020 provavelmente não representam o valor real de invenções protegidas na área pesquisada.

Figura 14 – Evolução anual dos documentos depositados relacionados ao tema da pesquisa.



Fonte: Autor

O aumento do número de depósitos pode estar relacionado a uma tendência mundial no uso de produtos ecológicos e na otimização de processos industriais (BILAL *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2019). Um exemplo de otimização no setor industrial e redução de danos ambientais através da reutilização de produtos vem do setor metalúrgico. O forte investimento em novas tecnologias e gestão nos últimos anos permitiu ao setor atingir um índice de eficiência de 97,6% na produção mundial de aço, uma redução de 58% nas emissões de CO<sub>2</sub> e de 60% no consumo de energia (BISWAL *et al.*, 2020). A indústria fotovoltaica promoveu investimentos significativos na reciclagem de resíduos, levando ao desenvolvimento de painéis solares sustentáveis através da recuperação de resíduos de silício (LI *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020). Em todo o mundo, menos de 10% de todos os polímeros já produzidos foram reciclados e a América do Sul não está fora dessa realidade com taxas de reciclagem anuais abaixo de 20%. Assim, a reciclagem de resíduos plásticos representa uma oportunidade de desenvolvimento econômico (VALERIO *et al.*, 2020).

A Figura 15 apresenta a matriz da análise de patentes. Foi identificado que 59% dos documentos fazem menção ao uso no setor de construção e 41% ao uso no setor industrial. As seções C, B e E foram as mais utilizadas para classificar patentes de acordo com a Classificação Internacional de Patentes (IPC). Um total de 54% dos documentos de patentes analisados estão expirados, enquanto que 36% vigentes e 10% não puderam

ser identificados devido à falta de informações no banco de dados da Derwent. Japão (26%), Estados Unidos (20%) e Coreia do Sul (16%) foram as nações que mais depositaram patentes relacionadas ao tema de pesquisa. De acordo com a aplicação da tecnologia, 48% das patentes são destinadas ao revestimento de superfícies, 20% função estrutural, 19% antimicrobiana, 4% impermeabilizante, 3% isolamento acústico, 2% isolamento elétrico, 2% isolamento térmico, 1% resistência a agentes químicos, 1% proteção contra corrosão e 1% drenagem.

Figura 15 – Matriz da análise de patentes.

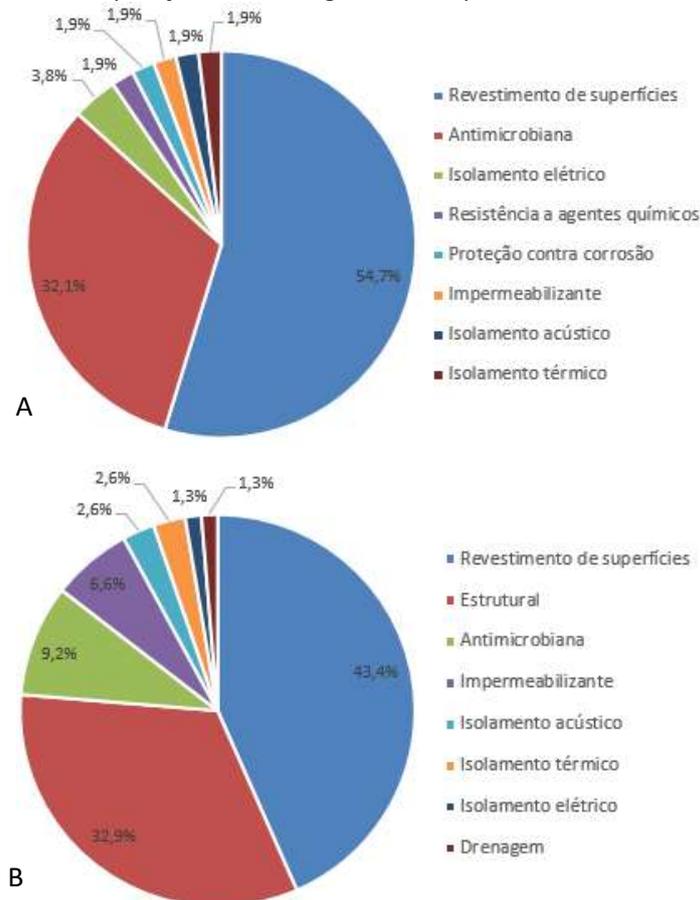
Setor de uso	Organização de Depósito de Patente	Aplicação
Construção	Japão	Revestimento de superfícies
Industrial	Estados Unidos	Estrutural
Classificação Internacional de Patentes	Coreia do Sul	Antimicrobiana
Seção C (química; metalurgia)	Escritório Europeu de Patentes	Impermeabilizante
Seção B (desempenho operacional; transporte)	China	Isolamento acústico
Seção E (construções fixas)	Organização Mundial da Propriedade Intelectual	Isolamento elétrico
Seção A (necessidades humanas)	Austrália	Isolamento térmico
Seção D (têxtis; papel)	Alemanha	Resistência a agentes químicos
Situação do documento de patente	Brasil	Proteção contra corrosão
Expirado	Índia	Drenagem
Vigente	Canadá	
Indeterminado	México	

Fonte: Autor

Existem estudos para a aplicação de compósitos poliméricos em diversos segmentos da construção civil, como tabuleiros de pontes, pisos com alta resistência a temperaturas, reabilitação de estradas e impermeabilizações (WANG *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2020; HUANG *et al.*, 2020; LEE *et al.*, 2020; TUNC, 2019; BOSTANCI, 2020; AWAD *et al.*, 2020; ÇINAR e KAR, 2018; PAPPU *et al.*, 2019). Por outro lado, há uma demanda crescente impulsionada pela pandemia COVID-2019 por produtos resistentes à proliferação de microrganismos e o baixo número de patentes identificado na pesquisa neste segmento sugere uma oportunidade de investimento no desenvolvimento de novas tecnologias (BHATTACHARYYA *et al.*, 2020; RENDANA, 2020; MURALIDHARAN *et al.*, 2020). Em estudos recentes, pesquisadores desenvolveram compósitos poliméricos com relevante atividade antimicrobiana em sua superfície contra bactérias patogênicas de origem alimentar como: *Escherichia Coli*, *Staphylococcus Aureus*, *Salmonella Enteritidis* e o fungo *Candida Albicans* (MURALIDHARAN *et al.*, 2020; VENKATESAN *et al.*, 2020; PONTIN *et al.*, 2020; YANG *et al.*, 2020; GUTSANU e LISA, 2020).

A Figura 16 ilustra a relação entre a aplicação da tecnologia descrita no documento e o setor pretendido. Em ambos os setores, a aplicação mais comum é o revestimento de superfícies, porém com maior prevalência no setor industrial. A aplicação estrutural é majoritariamente prevalente no setor da construção enquanto que no setor industrial há uma prevalência das aplicações antimicrobianas. O emprego de compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas como impermeabilizantes, isolantes acústicos, produtos para drenagem e isolantes térmicos obtiveram números mais amplos no setor da construção, já no setor industrial o uso como isolantes elétricos, resistência a agentes químicos e proteção contra corrosão apresentaram maiores resultados.

Figura 16 – Relação entre a aplicação da tecnologia e o setor pretendido: A – industrial; B – construção.



Fonte: Autor

No caso específico do Brasil e de outros países da América do Sul, o baixo número de patentes pode indicar interesse insuficiente pela área de estudo ou carência cultural

de empresas e universidades pelo depósito de documentos, apesar da aplicabilidade do produto no mercado.

Infelizmente, os países em desenvolvimento têm se caracterizado pela falta ou ineficiência de políticas de cooperação que garantam maior comunicação e competitividade internacional. O documento de patente permite o acesso público a informações detalhadas sobre uma tecnologia específica (invenções) e fornece orientação sobre quais pesquisas são realizadas por empresas, instituições ou indivíduos. O relatório com os indicadores mundiais de propriedade intelectual publicado pela WIPO - Organização Mundial da Propriedade Intelectual em 2019, aponta que a China lidera o ranking em todas as categorias (patentes, modelos de utilidade, marcas, desenho industrial, variedades vegetais), seguida pelos Estados Unidos, Japão, Coréia do Sul e Alemanha respectivamente em número de patentes depositadas em 2018, enquanto o Brasil ocupa o 26º lugar nesta lista (WIPO, 2019).

Diante do que foi apresentado, estima-se que haja um aumento no desenvolvimento de novas tecnologias em revestimentos voltados para construção civil, comportamento destacado nos países desenvolvidos como sugere a prospecção tecnológica e impulsionado pelo movimento global da adoção de práticas sustentáveis.

## 5.2 Caracterização Física da Fibra

Os valores obtidos no ensaio utilizado para determinação da densidade das fibras de PET estão descritos na Tabela 3 e a partir destes valores, foi encontrada a densidade média das fibras de PET utilizadas ( $1,045 \pm 0,0157$ ) g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 3 – Densidade da Fibra PET.

Amostra	Massa (g)	Volume M (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
A1	5,018	4,8	1,045
A2	5,044	4,9	1,029
A3	5,017	4,8	1,045
A4	5,053	4,9	1,031
A5	5,045	4,7	1,073
Média	5,044	4,8	1,045
		Desvio Padrão	0,0157

Fonte: Autor

A densidade média encontrada no banco de dados do Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (2021), que é um instituto público de pesquisa e de controle pertencente às cooperativas profissionais alemãs, difere da apresentada no estudo, o instituto apresenta uma densidade de  $1,38 \text{ g/cm}^3$  para o PET. Esta incompatibilidade nos valores pode ter ocorrido devido aos distintos métodos adotados para determinação dos valores da propriedade física, tendo o instituto utilizado como equipamento de medição um picnômetro, que consiste em um instrumento designado especificamente para determinar a densidade de materiais sólidos e líquidos.

O resultado obtido para a densidade da fibra de PET indica que essa fibra, quando comparada a fibra de vidro de densidade  $2,54 \text{ g/cm}^3$ , pode resultar em compósitos mais leves (NETO e PARDINI, 2016).

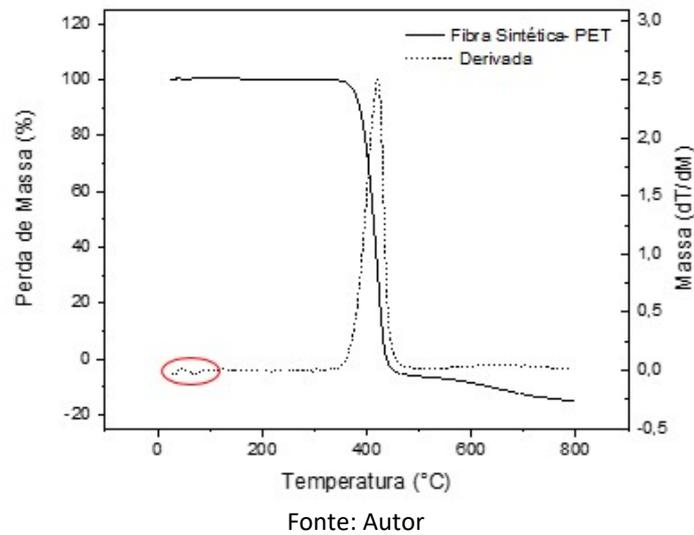
### **5.3 Caracterização Térmica da Fibra**

Segundo Elalaoui *et al.* (2018) a restrição do uso de polímeros em ambientes com elevadas temperaturas é uma barreira a ser vencida para ampliação da aplicabilidade do material, conhecer a estabilidade térmica e máxima temperatura de serviço das fibras PET é de suma importância para identificar a influência da temperatura nas características mecânicas do material e no desenvolvimento de compósitos tecnologicamente superiores.

A Figura 17 apresenta a curva termogravimétrica da fibra de PET, sendo possível observar a ocorrência de discretos eventos até aproximadamente  $100^\circ\text{C}$ , associados à perda de água pela amostra durante a exposição do material a elevação de temperatura.

O gráfico permite visualizar uma estabilidade térmica da fibra PET até aproximadamente  $325,44^\circ\text{C}$  e após este ponto, o material perde toda a sua massa em uma única etapa até  $464,06^\circ\text{C}$ .

Figura 17 – Curva termogravimétrica da Fibra de PET.

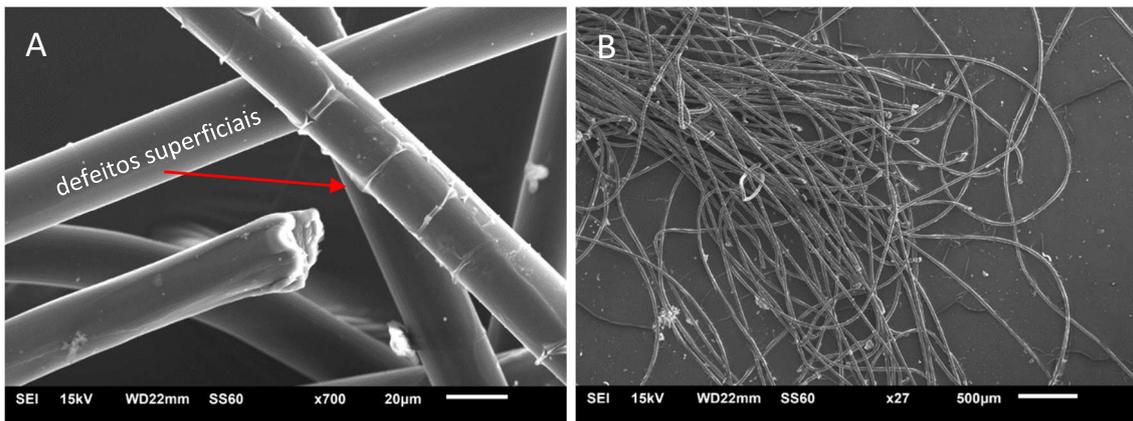


Os dados apresentados durante o experimento estão de acordo com os resultados obtidos por Bannach *et al* (2011), que indicaram estabilidade térmica da amostra até a temperatura de 350°C. Essa estabilidade térmica a temperaturas acima de 300°C apresentada pelas fibras sugere que em condições habituais de aplicação na construção civil, o reforço mantenha suas propriedades físicas/mecânicas.

#### 5.4 Caracterização Morfológica da Fibra

Na Figura 18 são apresentadas as micrografias da fibra de PET. De acordo com as imagens, as fibras apresentaram superfície lisa, porém com pequenos defeitos superficiais. Segundo Shaikh (2020) as causas desses defeitos superficiais não são precisamente definidas, podendo surgir durante o processo de obtenção das fibras ou durante processo de secagem para remoção de umidade do material. Na Figura 18A observa-se que as fibras utilizadas nessa pesquisa apresentam uma seção transversal circular, com diâmetro entre 20 e 30µm.

Figura 18 – MEV da Fibra PET com aumento de: A - 700x; B - 27x.

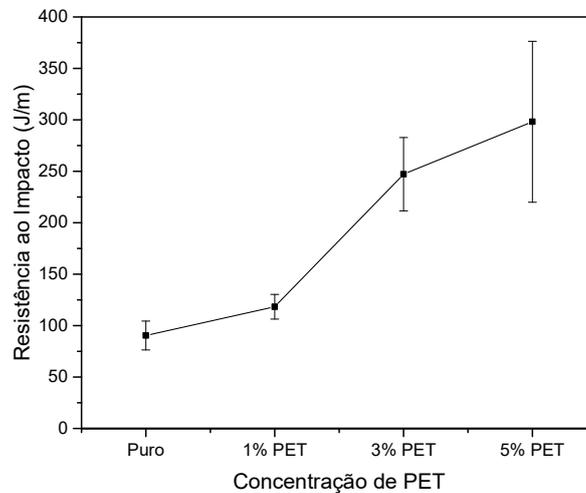


Fonte: Autor

### 5.5 Caracterização Mecânica dos Compósitos

As propriedades mecânicas de resistência ao impacto e flexão dos compósitos obtidos, variando-se a concentração da fibra PET em comparação com o polímero puro, são apresentadas nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Resistência ao Impacto de Compósitos com Fibra de PET.



Fonte: Autor

De acordo com os resultados, houve um aumento significativo da resistência ao impacto dos compósitos com a adição das fibras PET. A adição de 5% das fibras resultou em um aumento superior a 300% desta propriedade, o que sugere que as fibras atuaram como intensificadoras da tenacidade à fratura por impacto. Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores, foi observado pelos mesmos um aumento da resistência ao impacto dos compósitos com a elevação do teor de fibras PET

incorporadas (ASGARI e MASOOMI, 2012). A dificuldade no processo de moldagem das amostras foi um fator limitante em testes com maiores teores de fibras. O aumento na concentração do reforço dificultou a distribuição homogênea das fibras bem como favoreceu o surgimento de vazios nas amostras (Figura 20). Possivelmente, essas falhas no processo de obtenção das amostras implicaram no aumento do desvio padrão em maiores concentrações de reforços.

Figura 20 – Amostras com 5% de fibras PET descartadas por apresentarem falhas no processo de obtenção dos compósitos.

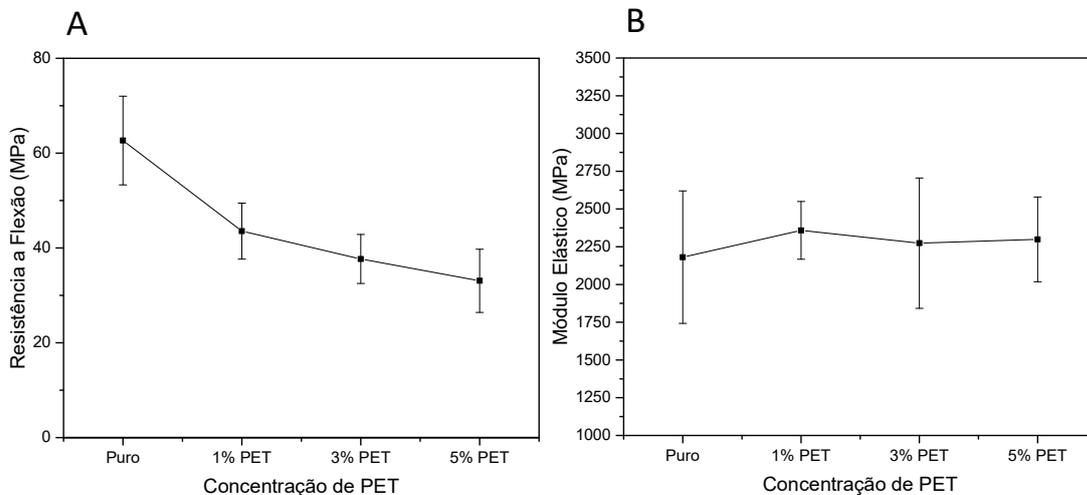


Fonte: Autor

Na Figura 21A foi possível observar, de uma maneira geral, que o aumento da fração volumétrica da fibra levou à redução da resistência à flexão. Os compósitos com 5% de fibra de PET apresentaram uma redução de 47% nesta propriedade quando comparado ao polímero puro. Este resultado pode ser justificado pelo surgimento de vazios durante o processo de moldagem das amostras, os vazios atuam como pontos de concentração de tensões no compósito, o que leva à ruptura do material quando submetido a tensões menores que as causadas pela ruptura por flexão da matriz de poliéster puro (ZARATE *et al*, 2003). Outros fatores também podem ter influenciado o resultado, como a presença de umidade, o que dificulta a adesão entre as fases e a não utilização de compatibilizante. Compósitos constituídos por fibras dispostas de forma aleatória, podem ser considerados isotrópicos e possuem eficácia no aumento da

resistência ao impacto através da adequada distribuição na energia ao longo da estrutura (MEYERS e CHAWLA, 2008; CHAWLA, 2012). Esse fato poderia justificar a os bons resultados obtidos na resistência ao impacto do material em detrimento dos baixos valores na resistência à flexão. A Figura 21B sugere que o módulo elástico se manteve estável, porém os altos desvios padrões supostamente causados por falhas no processo de obtenção das amostras dificultaram a análise do resultado.

Figura 21 – Resultados das propriedades de flexão dos compósitos: A - Resistência a Flexão de compósitos com Fibra de PET; B - Módulo Elástico de compósitos com Fibra de PET.



Fonte: Autor

Os elementos de revestimento na construção civil em grande parte apresentam-se ligados a uma base rígida por meio de uma camada de fixação (Figura 22), essa base sólida permite que os revestimentos não sejam substancialmente requisitados a esforços de flexão, porém suas posições de exposição ao ambiente os deixam susceptíveis a situações de impacto com objetos cotidianos.

Figura 22 – Exemplo genérico de um sistema de pisos e seus elementos.



Fonte: NBR 15575-3

A NBR 15575-3 (2013) estabelece critérios mínimos para os ensaios de impacto: o elemento de piso deve resistir a impactos com até 30J, entretanto, os compósitos com adição de 5% de fibras exibiram valores 10x maiores que os estabelecidos pela NBR 15575-3.

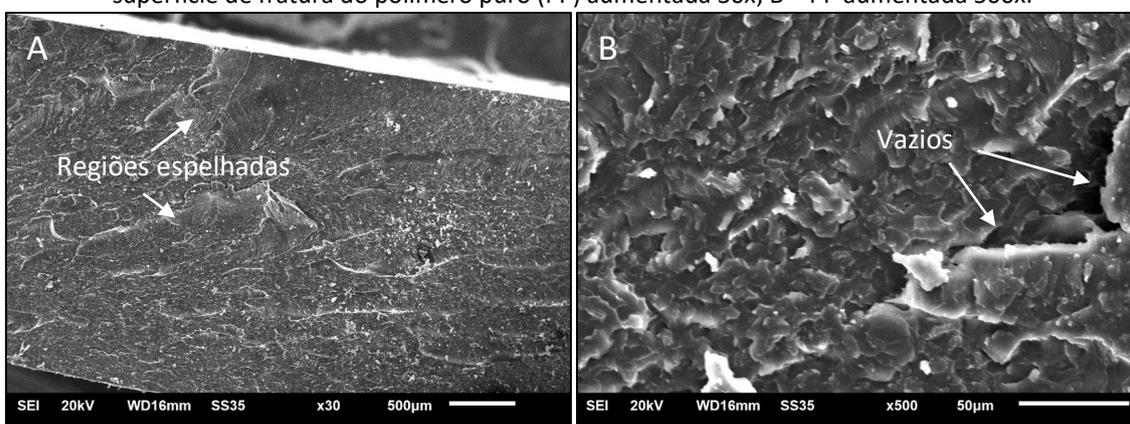
Com relação a resistência a flexão, a mesma norma preconiza que o revestimento deve apresentar uma resistência mínima a flexão de 10 MPa. Mesmo com a observada queda na resistência a flexão do compósito com a elevação dos teores de fibras, as formulações estudadas atenderam de forma satisfatória aos requisitos da NBR 15575-3.

### 5.6 Análise Morfológica dos Compósitos

As superfícies de fratura dos compósitos foram avaliadas mediante microscopia eletrônica de varredura, técnica através da qual é possível avaliar a interface entre os constituintes dos compósitos. A interface é responsável pela transferência de solicitação mecânica entre a matriz e a fibra e pode ser influenciada por alguns fatores como afinidade química, ancoramento mecânico e processo de fabricação (NETO e PARDINI, 2016).

A Figura 23A apresenta a micrografia da superfície fraturada após ensaio de impacto da amostra composta por resina pura. É possível observar uma superfície de fratura característica dos polímeros termofixos com a presença de regiões espelhadas, apontando rigidez do material, fragilidade e baixa ductilidade (SANTOS, 2012). Na Figura 23B, com maiores ampliações, é possível identificar alguns vazios, o que indica que o método de obtenção dos compósitos deve ser ajustado para minimizar tais falhas.

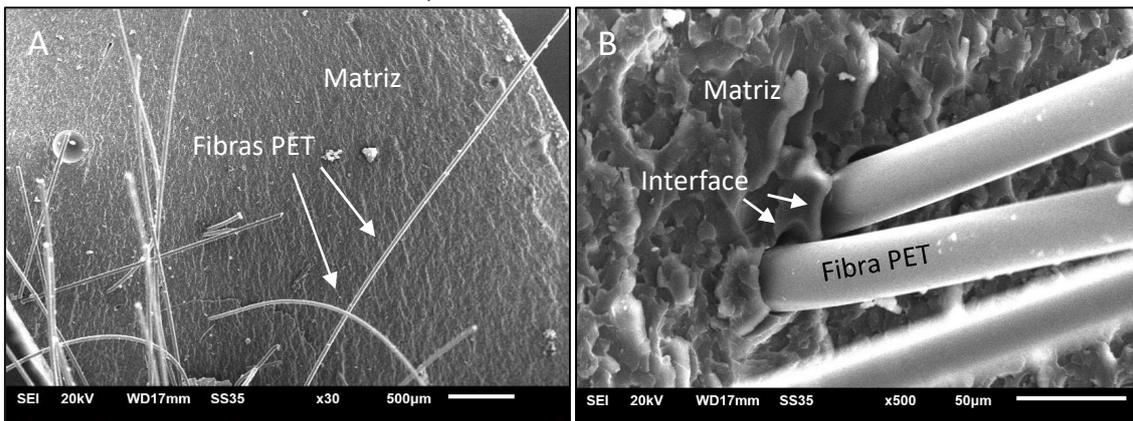
Figura 23 – Microscopia Eletrônica de Varredura das superfícies dos compósitos: A – Imagem da superfície de fratura do polímero puro (PP) aumentada 30x; B – PP aumentada 500x.



Fonte: Autor

A Figura 24A apresenta a superfície de fratura do compósito com 1% de fibra PET. Por meio da micrografia é possível identificar a fase dispersa composta pelas fibras e a fase contínua formada pela resina de poliéster insaturado. Na Figura 24B é possível observar também a interface deficiente entre as duas fases com pequenos espaços entre as fibras e a matriz, um indicativo de baixa adesão entre os materiais ou formação de vazios durante o processo de moldagem do corpo de prova.

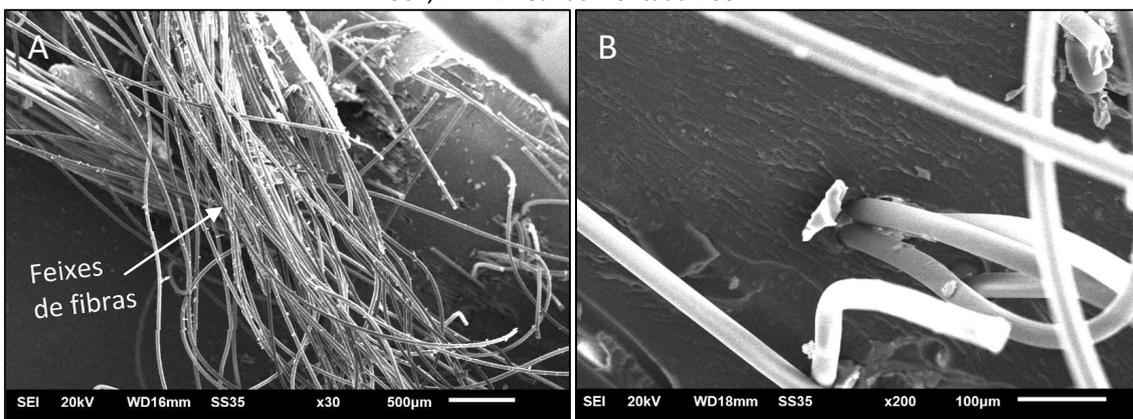
Figura 24 – Microscopia Eletrônica de Varredura das superfícies dos compósitos: A – PET 1% aumentada 30x; B – PET 1% aumentada 500x.



Fonte: Autor

As Figuras 25A e B exibem a superfície de fratura do compósito com 3% de fibra PET, correspondendo a ampliações de 30 e 200x respectivamente. Nas imagens é possível observar a formação de feixes de fibras, um indicativo de má distribuição das mesmas, o que favorece a formação de vazios criando zonas susceptíveis a fraturas.

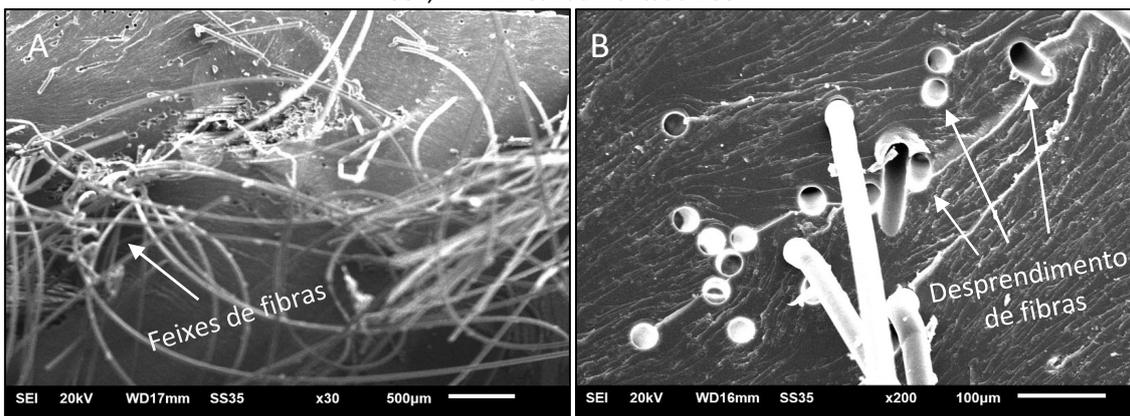
Figura 25 – Microscopia Eletrônica de Varredura das superfícies dos compósitos: A – PET 3% aumentada 30x; B – PET 3% aumentada 200x.



Fonte: Autor

A micrografia do compósito com 5% de fibra PET (Figura 26A) também apresenta formação de diversos feixes de fibras, fenômeno que possivelmente refletiu na diminuição dos valores de resistência a flexão com o aumento na concentração de fibras. Ademais, a Figura 26B exibe diversos vazios com diâmetro e forma similar ao das fibras, apontando provável desprendimentos das fibras por baixo ancoramento com a matriz.

Figura 26 – Microscopia Eletrônica de Varredura das superfícies dos compósitos: A – PET 5% aumentada 30x; B – PET 5% aumentada 200x.



Fonte: Autor

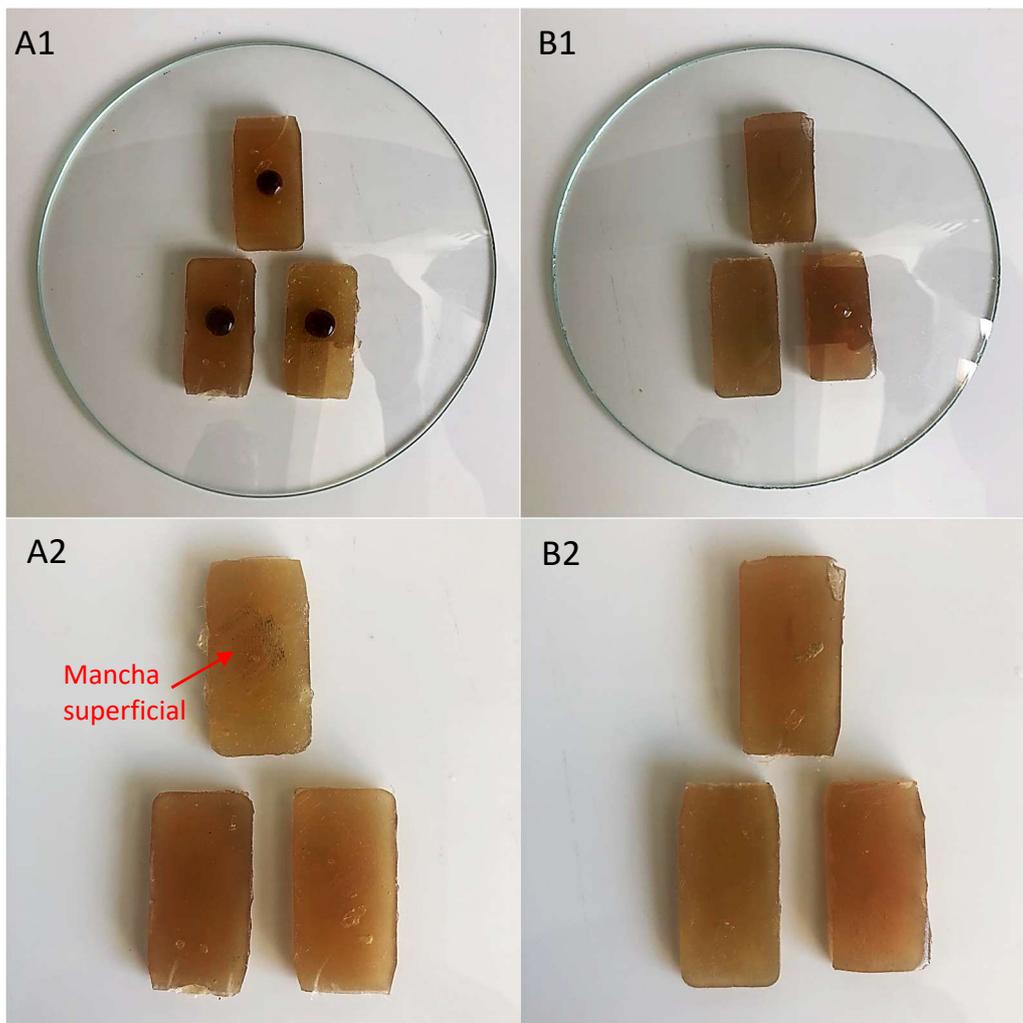
As imagens de MEV indicaram que a irregular distribuição das fibras durante a conformação das amostras possivelmente contribuiu para formação de vazios e feixes de fibras, resultando na diminuição da força de adesão entre o reforço e a matriz do compósito. Apesar das concentrações mais elevadas apresentarem expressivo aumento na resistência ao impacto quando comparado ao polímero puro, foram evidenciados os valores elevados no desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos. Esse comportamento, em conjunto com as imagens apresentando má distribuição das fibras, formação de feixes, presença de vazios e sinais de desprendimentos, justificariam a elevação do desvio padrão dos ensaios.

Novas metodologias de conformação para mitigação de vazios, melhor distribuição das fibras e uso de compatibilizantes devem ser estudadas no intuito de atingir melhores resultados.

## 5.7 Resistência Química dos Compósitos

O ensaio de resistência química do compósito foi baseado na NBR 15575-3 que preconiza a exposição do elemento estudado a produtos domésticos de limpeza e de agentes químicos normalmente utilizados na edificação, seguida da avaliação visual para busca da ocorrência de danos causados a superfície do revestimento. A Figura 27 apresenta o registro das amostras de compósitos expostas a diferentes soluções. Para tanto, foram selecionadas 6 amostras de compósitos com 5% de teor de fibras PET, sendo 3 submetidas por 16h a café com concentração 120g/L e as demais a detergente neutro por 24 horas.

Figura 27 – Ensaio de Resistência Química: A1 – Ensaio com amostras submetidas por 16h a café com concentração 120g/L; A2 – Resultado visual do ensaio com amostras submetidas a café; B1 – Ensaio com amostras expostas a detergente neutro por 24 horas; B2 – Resultado visual do ensaio com amostras expostas a detergente neutro.



Fonte: Autor

A Tabela 4 apresenta a classificação visual referendada pela NBR 15575-3 para análise qualitativa dos resultados apresentados no ensaio de resistência química. Seguindo os critérios da norma, as amostras submetidas por 16h a café com concentração 120g/L, apresentaram nível de dano 3 e 4, enquanto que as amostras expostas a detergente por 24 horas não apresentaram alterações visíveis de suas superfícies, atingindo o nível 4. O documento não estabelece níveis mínimos a serem atingidos pelo material, apenas estabelece critérios para melhor qualificação dos resultados.

Tabela 4 – Avaliação visual da ocorrência de danos a superfície do revestimento conforme NBR 15575-3.

Níveis de dano	Descrição
4	nenhuma alteração visível.
3	leve a moderada alteração de brilho e/ou cor, visível em qualquer ângulo de observação.
2	severa alteração de brilho e/ou cor, mas sem ataque da superfície.
1	ataque da superfície na forma de rachaduras, fissuras ou bolhas.

Fonte: NBR 15575-3, 2013.

## 5.8 Comportamento dos Compósitos a Exposição Ultravioleta

Quando materiais poliméricos são expostos à radiação ultravioleta (UV), dar-se início a um processo de degradação que resulta em perda nas propriedades físicas e químicas do material. Este comportamento está associado ao processo de oxidação, resultando na descoloração das amostras, redução da flexibilidade, fissuras e superfícies quebradiças (BARBOS *et al.*, 2020; CUNHA *et al.*, 2017).

A fotodegradação é iniciada pela radiação solar, que resulta na absorção da radiação UV por cromóforos e na ativação de estados excitados em macromoléculas, a energia absorvida pelo polímero resulta na formação de radicais livres pela dissociação das ligações C-H das cadeias poliméricas. A extensão desta reação química depende da exposição à radiação ultravioleta (<350nm) à qual está exposto. Uma vez que os radicais livres foram produzidos, a reação com o oxigênio gera hidroperóxido, que por sua vez podem se dissociar ainda mais para produzir uma série de produtos de decomposição incluindo aldeídos e cetonas (SALEH, 2012).

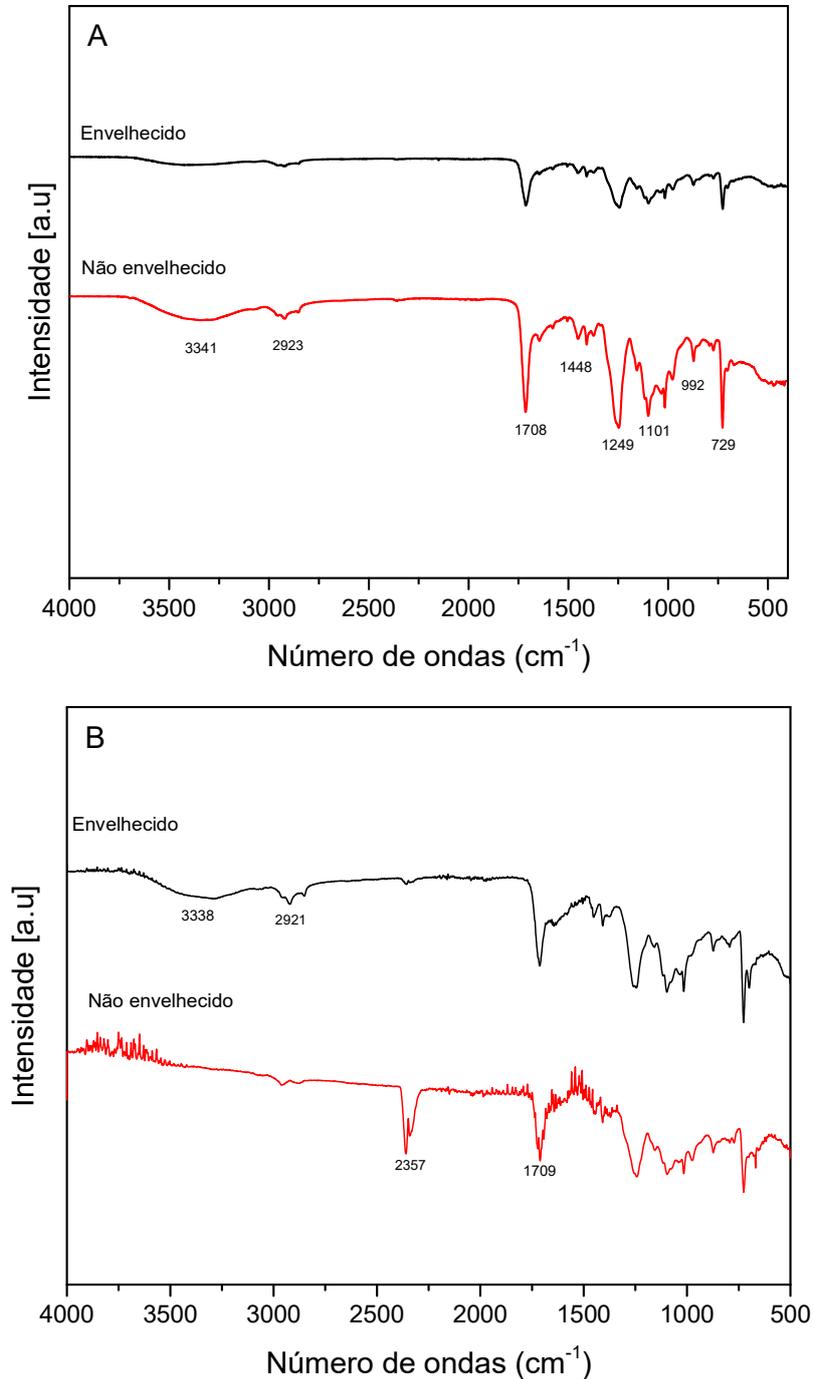
Para a análise do efeito do envelhecimento acelerado dos compósitos, foram selecionadas 2 amostras contendo resina pura e 2 amostras do com teor de fibras PET 5% (compósito que apresentou o melhor resultado mecânico). Após o período de exposição a câmara, as amostras foram avaliadas através de espectroscopia no infravermelho (FT-IR) para análise das eventuais degradações causada pela exposição prolongada a radiação UV.

A Figura 28 apresenta um comparativo entre os espectros de absorção das amostras envelhecidas contendo resina pura e não envelhecidas na câmara de degradação (Figura 28A), além de comparativo entre os espectros de absorção das amostras contendo fibras PET 5% envelhecidas e não envelhecidas (Figura 28B).

O espectro obtido para a resina de poliéster pura não envelhecida (Figura 28A) apresenta uma banda espectral forte em  $729\text{ cm}^{-1}$  e uma banda fraca em  $1101\text{ cm}^{-1}$  que pode ser atribuída à vibração do grupo  $-\text{CH}$  da posição 1 e 3 no anel benzeno e vibração do  $-\text{C}=\text{CH}$ . Observa-se uma banda espectral em  $1101\text{ cm}^{-1}$  que confirma a presença da ligação éster  $-\text{C}-\text{O}-\text{C}$  e um forte pico em  $1249\text{ cm}^{-1}$  que pode ser atribuído ao grupo  $-\text{C}=\text{C}-$ . Uma banda espectral em  $1448\text{ cm}^{-1}$  que pode ser atribuída à vibração de  $-\text{C}-\text{H}$ . A presença de  $-\text{C}=\text{O}$  e alongamento simétrico de  $-\text{CH}$  foram confirmado pela presença das bandas em  $1708\text{ cm}^{-1}$  e  $2923\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente. Em  $3341\text{ cm}^{-1}$  verifica-se uma banda espectral referente às vibrações do grupo  $-\text{OH}$ .

É possível observar uma similaridade nos gráficos das amostras envelhecidas e não envelhecidas contendo somente resina poliéster, não sendo observada a formação de novos picos que indicariam a degradação. No entanto, observa-se uma redução na intensidade dos picos na amostra envelhecida.

Figura 28 – A – Comparativo entre os espectros de absorção das amostras contendo resina pura envelhecidas e não envelhecidas na câmara de degradação; B – Comparativo entre os espectros de absorção das amostras contendo fibras PET 5% envelhecidas e não envelhecidas na câmara de degradação.



Fonte: Autor

As curvas de FTIR obtidas para os compósitos com a fibra PET apresentam os picos identificados para a resina poliéster pura. Observa-se uma banda espectral com mais intensidade na amostra não envelhecida em 2357 cm<sup>-1</sup> correspondente a

deformação simétrica axial do CO<sub>2</sub> (PEREIRA *et al*, 2017). Segundo Santos *et al.* (2018), de forma geral os espectros do PET são constituídos pela banda larga entre 2200 e 3400 cm<sup>-1</sup>, correspondente ao grupo –OH ligado à carbonila, bem como do pico da carbonila, localizado em 1680 cm<sup>-1</sup>, picos próximos aos descritos na referência foram identificados nas amostras estudadas.

Na Figura 28B o gráfico obtido para as amostras com 5% de fibras PET submetidas a câmara de degradação sofreram uma diminuição na banda larga entre 2200 e 3400 cm<sup>-1</sup> correspondente ao grupo –OH, passando a assemelhar-se ao gráfico das amostras contendo somente resina poliéster. Essa alteração no gráfico sugere que as fibras PET em comparação a matriz polimérica sofreram mais intensamente os efeitos da exposição aos raios UV.

### 5.9 Absorção de Água pelo Compósito

A permeabilidade dos compósitos foi aferida por meio do ensaio de absorção de água, estando o experimento relacionado com a porosidade do material e a obtenção desses valores é fundamental para determinação do uso de cada material.

A Tabela 5 expõe os critérios quantitativos e grupos de classificação propostos pela NBR 13818 para utilização no ensaio de absorção.

Tabela 5 – Grupos de absorção segundo resultados do ensaio de absorção de água.

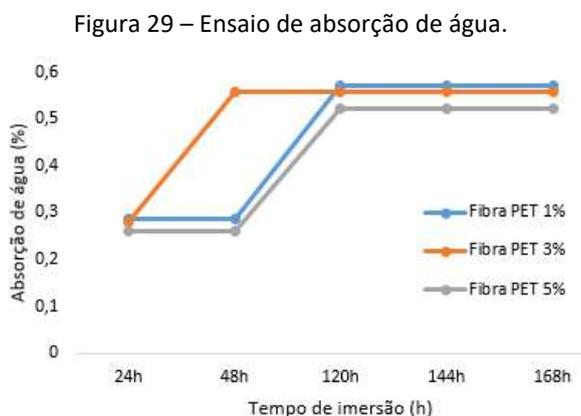
Grupos de absorção de água (%)	
Grupos	Absorção de água (%)
Ia	Abs ≤ 0,5
Ib	0,5 < Abs ≤ 3,0
IIa	3,0 < Abs ≤ 6,0
IIb	6,0 < Abs ≤ 10,0
III	Abs acima de 10,0

Fonte: NBR 13818, 1997.

Kumari *et al.* (2021) avaliaram a taxa de absorção de água em compósitos constituídos por resina poliéster reforçados com 10, 20 e 30% do peso em fibras de sisal, os autores obtiveram no teor máximo da fibra uma taxa de aproximadamente 23%. Hafidz *et al.* (2021) também desenvolveram compósitos com fibras naturais e avaliaram a taxa de absorção em compósitos reforçados com 30, 40 e 60% de fibras de palma e

matriz poliéster. O compósito contendo 30% de fibras apresentou o melhor resultado (1,44%). Em contrapartida, utilizando fibras sintéticas, Chellamuthu e Vasanthanathan (2020), realizaram estudo com compósitos poliméricos reforçados com fibras PET e fibras de vidro. Os autores obtiveram ao final do estudo uma taxa de absorção média de 0,87% para as fibras PET.

A Figura 29 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água, todas as formulações obtiveram estabilidade após 120h de imersão e taxa de absorção inferior a 0,6%, o que segundo critérios de classificação da NBR 13818 as enquadram no grupo Ib. Não foi possível estabelecer relação com o aumento dos teores de fibra e taxa de absorção de água.



Fonte: Autor

O Sinduscon-MG (2009), como mostra a Tabela 6, apresenta uma correlação entre os grupos de absorção de água estabelecidos pela NBR 13818 e a classificação comercial dos revestimentos cerâmicos encontrados usualmente no mercado. Seguindo os critérios dessa classificação os compósitos em estudo seriam compatíveis ao revestimento comercialmente denominado como cerâmica tipo Grês.

Tabela 6 – Classificação das cerâmicas segundo resultados do ensaio de absorção de água.

Classificação das Cerâmicas pelo Grupo de Absorção	
Absorção de água (%)	Produto
Abs ≤ 0,5	Porcelanato
0,5 < Abs ≤ 3,0	Grês
3,0 < Abs ≤ 6,0	Semi-Grês
6,0 < Abs ≤ 10,0	Semi-Poroso
Abs acima de 10,0	Poroso

Fonte: SINDUSCON-MG, 2009.

## 6. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um compósito polimérico fibroso utilizando resíduos de fibras de PET para aplicação na construção civil como elemento de revestimento.

- A prospecção tecnológica realizada sugere um aumento no desenvolvimento de novas tecnologias em revestimentos voltados para construção civil, sobretudo em países desenvolvidos impulsionado pelo movimento global da adoção de práticas sustentáveis.
- Foi encontrada uma densidade média para as fibras PET de  $1,045 \pm 0,0157 \text{ g/cm}^3$ .
- As fibras PET apresentaram estabilidade térmica até aproximadamente  $325,44^\circ\text{C}$ .
- As fibras apresentaram superfície lisa, porém com pequenos defeitos superficiais e diâmetro entre 20 e  $30\mu\text{m}$ .
- A adição de 5% das fibras resultou em um aumento superior a 300% na resistência ao impacto, entretanto, evidenciou-se valores elevados no desvio padrão dos resultados.
- O aumento da fração volumétrica da fibra levou à redução da resistência à flexão, supostamente justificada pelo surgimento de vazios durante o processo de moldagem das amostras com a elevação dos teores de fibras.
- Os compósitos com adição de 5% de fibras exibiram uma resistência ao impacto 10x superior ao estabelecido pela NBR 15575-3.
- Mesmo com a observada queda na resistência a flexão do compósito com a elevação dos teores de fibras, as formulações estudadas atenderam de forma satisfatória aos requisitos da NBR 15575-3.
- As imagens de MEV indicaram que a irregular distribuição das fibras evidenciadas com o aumento da concentração, possivelmente contribuiu para formação de vazios e feixes de fibras, resultando na diminuição da força de adesão entre o reforço e a matriz do compósito.

- As amostras submetidas por 16h a café com concentração 120g/L, apresentaram nível de dano 3 e 4 segundo a classificação visual da NBR 15575-3.
- Os espécimes expostos a detergente por 24 horas não apresentaram alterações visíveis de suas superfícies, atingindo o nível 4 de dano.
- Observou-se uma similaridade nos gráficos das amostras envelhecidas e não envelhecidas das amostras contendo somente resina poliéster. As amostras com 5% de fibras PET submetidas a câmara de degradação sofreram uma diminuição na banda larga entre 2200 e 3400  $\text{cm}^{-1}$  correspondente ao grupo  $-\text{OH}$ , passando a assemelhar-se ao gráfico das amostras contendo somente resina poliéster. Essa alteração no gráfico sugere que a fibras PET em comparação a matriz polimérica sofreram mais intensamente os efeitos da exposição aos raios UV.
- Todas as formulações obtiveram estabilidade após 120h de imersão e taxa de absorção inferior a 0,6%.
- Segundo critérios de classificação da NBR 13818 os resultados obtidos enquadram os compósitos no grupo de absorção Ib.

Por fim, o estudo mostra que a fibra de PET, oriunda de resíduo industrial, tem potencial de utilização como reforço em compósitos com matriz poliéster. No entanto, sugere-se o desenvolvimento de estudos abordando outros tipos de processamento e obtenção dos corpos de prova para mitigar a formação de vazios nas amostras, além de permitir a incorporação de maiores teores de fibras.

## REFERÊNCIAS

1. \_\_\_\_\_. Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento (ANFACER): Manual Setorial Orientativo para Atendimento à Norma de Desempenho ABNT NBR15575: 2013. Rio de Janeiro: ANFACER, 2016
2. \_\_\_\_\_. NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
3. \_\_\_\_\_. NBR 15575-3: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
4. \_\_\_\_\_. Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais (SINDUSCON-MG): Programa Qualimat Sinduscon-MG – Placas Cerâmicas para Revestimento. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 2009.
5. \_\_\_\_\_. IFA. GESTIS - Substance Database - Polyethylene Terephthalate. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 2021
6. AL-HADITHI, Abdulkader Ismail; NOAMAN, Ahmed Tareq; MOSLEH, Waseem Khairi. Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC). **Composite Structures**, v. 224, p. 111021, 2019.
7. AN, L. et al. A scalable crosslinked fiberglass-aerogel thermal insulation composite. **Applied Materials Today**, v. 21, p 100843, December 2020
8. ANDREW, R. M. Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production, 1928–2017. **Earth System Science Data**, v. 10, p. 2213–2239, 2018.
9. ASGARI, Mohammad; MASOOMI, Mahmood. Thermal and impact study of PP/PET fibre composites compatibilized with glycidyl methacrylate and maleic anhydride. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 3, p. 1164-1170, 2012.
10. \_\_\_\_\_. ASTM D4812 - 19. Standard Test Method for Unnotched Cantilever Beam Impact Resistance of Plastics. ASTM International, 2019.
11. \_\_\_\_\_. ASTM D570-98. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. ASTM International, 2018.
12. \_\_\_\_\_. ASTM D6348 - 12: Standard Test Method for Determination of Gaseous Compounds by Extractive Direct Interface Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. ASTM, 2020.
13. \_\_\_\_\_. ASTM D6370: Standard Test Method for Rubber—Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA). ASTM, 1999.
14. \_\_\_\_\_. ASTM D638-14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, 2014.
15. \_\_\_\_\_. ASTM D790-17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International, 2017.
16. \_\_\_\_\_. ASTM G154 – 12. Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials. ASTM International, 2012.
17. \_\_\_\_\_. ASTM G154 – 12: Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials. ASTM, 2016.
18. AVCI, Akdemir; AKDEMIR, A.; ARIKAN, H. Mixed-mode fracture behavior of glass fiber reinforced polymer concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 2, p. 243-247, 2005.
19. AWAD, A. H. et al. Assessment of mechanical properties of HDPE composite with addition of marble and granite dust. **Ain Shams Engineering Journal**, 2020.
20. BAI, Yu et al. Environment-assisted degradation of the bond between steel and carbon-fiber-reinforced polymer. **Journal of materials in civil engineering**, v. 26, n. 9, p. 04014054, 2014.
21. BANNACH, Gilbert et al. Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica. **Química Nova**, v. 34, n. 10, p. 1825-1829, 2011.
22. BARBOS, Josiane Dantas Viana et al. Development and characterization of WPCs produced with high amount of wood residue. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 9684-9690, 2020.
23. Baroux, D. Method for forming melt-resistant glass fiber product, and associated apparatus. **US10329195B2**. United States. 2014
24. BAUER, Falcão LA. Materiais de Construção. **Revisada**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

25. BENMOKRANE, Brahim et al. Construction and testing of an innovative concrete bridge deck totally reinforced with glass FRP bars: Val-Alain Bridge on Highway 20 East. **Journal of Bridge Engineering**, v. 12, n. 5, p. 632-645, 2007.
26. BENTO, A. J. et al. A influência da NBR 15575 (2013) na durabilidade e vida útil das edificações residenciais. **Seminário de Patologia e Recuperação Estrutural, Recife, Brasil**, 2016.
27. BETIOLI, Andrea Murillo et al. Degradação de fibras de PET em materiais à base de cimento portland. 2003.
28. BHATTACHARYYA, Suvanjan et al. A novel CFD analysis to minimize the spread of COVID-19 virus in hospital isolation room. **Chaos, Solitons & Fractals**, p. 110294, 2020.
29. BILAL, M., Khan, KIA, Thaheem, MJ, Nasir, AR. Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework. **Journal of Cleaner Production**, 2020, 123250.
30. BISWAL, Smitirupa; PAHLEVANI, Farshid; SAHAJWALLA, Veena. Wastes as resources in steelmaking industry-current trend. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, p. 100377, 2020.
31. BORDIN, R; MILIS, M; HELLEMANS, P. Fiber cement decking products and methods for the production thereof. **US20190330107A1**. United States. 2018.
32. BOSTANCI, Sevet Can. Use of waste marble dust and recycled glass for sustainable concrete production. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119785, 2020.
33. CAREGNATO, L. Method for producing a continuous waterproofing flooring. **EP1573148A1**. European Patent Office. 2003.
34. CÉSAR, Janaína; DE PAOLI, Marco-Aurélio; DE ANDRADE, João Carlos. A determinação da densidade de sólidos e líquidos. **Revista Chemkeys**, n. 7, p. 1-8, 2004.
35. CHANDLER, D. L. New approach suggests path to emissions-free cement. *MIT NEWS*, disponível em: <http://news.mit.edu/2019/carbon-dioxide-emissions-free-cement-0916>. Acesso em outubro, 2019.
36. CHAWLA, Krishan K. **Composite materials: science and engineering**. Springer Science & Business Media, 2012.
37. CHELLAMUTHU, K.; VASANTHANATHAN, A. Experimental analysis of GFRP with PET for tensile load and water absorption. **Materials Today: Proceedings**, v. 21, p. 658-662, 2020.
38. ÇINAR, M. Emin; KAR, Filiz. Characterization of composite produced from waste PET and marble dust. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 734-741, 2018.
39. COE, W. B. Pavement repair system. **US9057163B1**. United States. 2014.
40. CUNHA, Ricardo Alex Dantas et al. Influência do Envelhecimento Acelerado nas Propriedades Mecânicas do PRFV Quando Imerso em Petróleo. **HOLOS**, v. 5, p. 238-249, 2017.
41. DANIEL, I. M; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford university press, 2006.
42. DE LIMA, Ana Carolina AC; DA ROCHA, Gabrielle S.; KONAGANO, Noemy Yuri H. A utilização de plásticos na construção civil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA-COBENGE**. 2012.
43. DE LUNA, Alejandro Meza; SHAIKH, Faiz Uddin Ahmed. Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120331, 2020.
44. DEGHAN, Zohreh; MODARRES, Amir. Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 384-393, 2017.
45. DEL RIO MERINO, Mercedes et al. Redesigning lightweight gypsum with mixes of polystyrene waste from construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 144-151, 2019.
46. ELALAOUI, Oussama; GHORBEL, Elhem; OUEZDOU, Mongi Ben. Influence of flame retardant addition on the durability of epoxy based polymer concrete after exposition to elevated temperature. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 233-239, 2018.
47. ELLIS, L. D. et al. Toward electrochemical synthesis of cement—An electrolyzer-based process for decarbonating CaCO<sub>3</sub> while producing useful gas streams. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, p. 201821673, 2019.

48. FAKIROV, S.; BHATTACHARYYA, D. Handbook of engineering biopolymers: homopolymers. **Blends, and Composites”, Hanser Gardner USA, 2007.**
49. FAN, W. W., LANGFORD, N. P., FISCHER Jr, R. M., & BARNES, A. S. Stain resistant polyurethane coatings. **US8030430B2.** United States. 2004.
50. FANG, Hai et al. Mechanical performance of concrete pavement reinforced by CFRP grids for bridge deck applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 110, p. 315-335, 2017.
51. FERRÁNDIZ-MAS, Verónica et al. Design of bespoke lightweight cement mortars containing waste expanded polystyrene by experimental statistical methods. **Materials & Design**, v. 89, p. 901-912, 2016.
52. GODAT, Ahmed et al. Use of FRP pultruded members for electricity transmission towers. **Composite Structures**, v. 105, p. 408-421, 2013.
53. GUADES, Ernesto et al. A review on the driving performance of FRP composite piles. **Composite Structures**, v. 94, n. 6, p. 1932-1942, 2012.
54. GUTSANU, Vasile; LISA, Gabriela. Composites containing metal and thiosemicarbazone: thermal, antimicrobial and antifungal properties. **Polyhedron**, p. 114800, 2020.
55. HABERT, G; MILLER, S.A., JOHN, V.M. *et al.* Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nat Rev Earth Environ** (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
56. HAFIDZ, N. S; Binti Mohd; REHAN, MS Bin Mohamed; MOKHTAR, H. Binti. Effect of alkaline treatment on water absorption and thickness swelling of natural fibre reinforced unsaturated polyester composites. **Materials Today: Proceedings**, 2021.
57. HUANG, Hao et al. Synthesis and characterization of ground glass fiber reinforced polyurethane-based polymer concrete as a cementitious runway repair material. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 117221, 2020.
58. \_\_\_\_\_.ISO 178: Plastics—Determination of flexural properties. International Organization of Standards: Geneva, Switzerland, 2001.
59. \_\_\_\_\_.ISO 180: Plastics - Determination of Izod Impact Strength. International Organization of Standards: Geneva, Switzerland, 2019.
60. \_\_\_\_\_.ISO 62: Plastics – Determination of water absorption. International Organization of Standards: Geneva, Switzerland, 2008.
61. JEON, Eun-Beom et al. Investigation of mechanical/dynamic properties of carbon fiber reinforced polymer concrete for low noise railway slab. **Composite structures**, v. 134, p. 27-35, 2015.
62. JUNG, Kyung-Chae; ROH, In-Taek; CHANG, Seung-Hwan. Thermal behavior and performance evaluation of epoxy-based polymer concretes containing silicone rubber for use as runway repair materials. **Composite Structures**, v. 119, p. 195-205, 2015.
63. KANMUKHLA, V. TRINDER Li, K. G. Solid Surfaces and antimicrobial treatments and processes for prepare the same. **AU2013299616A1.** Australia. 2013
64. KELLER, Thomas. Multifunctional and robust composite material structures for sustainable construction. In: **Advances in FRP composites in civil engineering**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. p. 20-25.
65. KHUN, N. W.; FRANKEL, G. S. Effects of surface roughness, texture and polymer degradation on cathodic delamination of epoxy coated steel samples. **Corrosion science**, v. 67, p. 152-160, 2013.
66. KRISHNAN, V. Antimicrobial and antistatic polymers and methods of using such polymers on various substrates. **JP2012035628A.** Japan. 2011.
67. KUMARI, Y. Ratna et al. Experimental investigation of water absorption behaviour of sisal fiber reinforced polyester and sisal fiber reinforced poly lactic acid composites. **Materials Today: Proceedings**, 2021.
68. LEE, Kicheol et al. Numerical approach to assessing the contact characteristics of a polymer-based waterproof membrane. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 79, p. 242-249, 2018.
69. LI, Jingwei et al. Progress in recovery and recycling of kerf loss silicon waste in photovoltaic industry. **Separation and Purification Technology**, v. 254, p. 117581.
70. LI, Ying-Ming; HU, Shuang-Lin; WANG, De-Yi. Polymer-based ceramifiable composites for flame retardant applications: A review. **Composites Communications**, v. 21, p. 100405, 2020.

71. LI, Yue; LIU, Ning; CHEN, Bing. Properties of lightweight concrete composed of magnesia phosphate cement and expanded polystyrene aggregates. **Materials and structures**, v. 48, n. 1-2, p. 269-276, 2015.
72. Lin, A, Tan, YK, Wang, CH., Kua, HW., Taylor, H. Utilization of Waste Materials in a Novel Mortar–Polymer Laminar Composite to be Applied in Construction 3D-Printing. **Composite Structures**, **2020**, 112764.
73. LIU, Caijie; ZHANG, Qin; WANG, Hai. Cost-benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China. **Waste Management**, v. 118, p. 491-500, 2020.
74. LU, Yonglong et al. Policy: Five priorities for the UN sustainable development goals. **Nature**, v. 520, n. 7548, p. 432-433, 2015.
75. LU, Yonglong et al. Policy: Five priorities for the UN sustainable development goals. **Nature News**, v. 520, n. 7548, p. 432, 2015.
76. MANJUNATH, R. N.; KHATKAR, Vikas; BEHERA, B. K. Comparative assessment of Static and Dynamic Mechanical Properties of Glass and PET fiber Reinforced Epoxy Composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 18, p. 4048-4057, 2019.
77. MARÍ, Antonio et al. Shear design of FRP reinforced concrete beams without transverse reinforcement. **Composites Part B: Engineering**, v. 57, p. 228-241, 2014.
78. MARINUCCI, G. Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e tecnologia. **São Paulo: Artliber Editora**, 2011.
79. MEYERS, Marc André; CHAWLA, Krishan Kumar. **Mechanical behavior of materials**. Cambridge university press, 2008.
80. MILAGRES, Bárbara Vidigal. Degradação de geotêxteis frente a elementos climáticos em ensaios de campo e laboratório: realidade climática local. 2016.
81. MILLING, Amrita; MWASHA, Abrahams; MARTIN, Hector. Exploring the Full Replacement of Cement with Expanded Polystyrene (EPS) Waste in Mortars used for Masonry
82. MIOTTO, José Luiz; DIAS, Antonio Alves. Structural efficiency of full-scale timber–concrete composite beams strengthened with fiberglass reinforced polymer. **Composite Structures**, v. 128, p. 145-154, 2015.
83. MISHRA, Brajesh; GUPTA, Mohit Kumar. Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 95-107, 2018.
84. MOHAJERANI, Abbas et al. Expanded polystyrene geof foam in pavement construction. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 438-448, 2017.
85. MOHAMMED, Azad A.; RAHIM, Aso A. Faqe. Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118350, 2020.
86. MURALIDHARAN, Sanjay Krishna et al. Recyclable antimicrobial sulphonated poly (ether ether ketone)–copper films: Flat vs micro-pillared surfaces. **Materials Today Communications**, v. 25, p. 101485, 2020.
87. NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher, 2016.
88. NETO, Flaminio Levy; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher, 2016.
89. OLOFINNADE, Oluwarotimi; CHANDRA, Sarath; CHAKRABORTY, Paromita. Recycling of high impact polystyrene and low-density polyethylene plastic wastes in lightweight based concrete for sustainable construction. **Materials Today: Proceedings**, 2020.
90. PAPPU, Asokan et al. Recycling marble wastes and Jarosite wastes into sustainable hybrid composite materials and validation through Response Surface Methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118249, 2019.
91. PEREIRA, Ana Paula dos Santos et al. Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymers concrete waste. **Materials Research**, v. 20, p. 411-420, 2017.
92. PEREIRA, Bruno Santos; BARBOSA, Renata; ALVES, Tatianny Soares. Avaliação da morfologia e propriedades mecânicas de compósitos laminados a base de epóxi, cortiça e microesferas de vidro. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 3, 2019.
93. PONTIN, Karine Patrin et al. Antimicrobial activity of copper surfaces against biofilm formation by *Salmonella Enteritidis* and its potential application in the poultry industry. **Food Microbiology**, p. 103645, 2020.

94. POSSAN, Edna; DEMOLINER, Carlos Alberto. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista técnico-científica**, v. 1, n. 1, 2013.
95. REIS, J. M. L.; FERREIRA, A. J. M. Fracture behavior of glass fiber reinforced polymer concrete. **Polymer testing**, v. 22, n. 2, p. 149-153, 2003.
96. RENDANA, Muhammad. Impact of the wind conditions on COVID-19 pandemic: A new insight for direction of the spread of the virus. **Urban climate**, v. 34, p. 100680, 2020.
97. ROH, In-Taek et al. Characterization of compliant polymer concretes for rapid repair of runways. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 77-84, 2015.
98. ROMÃO, Wanderson; SPINACÉ, Márcia AS; PAOLI, Marco-A. De. Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009.
99. SABA, N.; PARIDAH, M. T.; JAWAID, M. Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review. **Construction and Building materials**, v. 76, p. 87-96, 2015.
100. Saint-Gobain Weber. Covering tile. **JP05749425B2**. Japan. 2015.
101. SALEH, Hosam El-Din M. (Ed.). **Polyester**. BoD—Books on Demand, 2012.
102. SANTOS JÚNIOR, Waldir Belisário dos. Desempenho, durabilidade, degradação e vida útil: aspectos técnicos no desenvolvimento do plano de manutenção de fachadas. 2016.
103. SANTOS, Rachel Passos de Oliveira. **Compósitos baseados em PET reciclado, fibras de sisal e plasticizantes oriundos de fontes renováveis: estudo do processamento e propriedades destes materiais**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
104. SEGRE, N.; TONELLA, E.; JOEKES, I. Evaluation of the stability of polypropylene fibers in environments aggressive to cement-based materials. **Cement and Concrete research**, v. 28, n. 1, p. 75-81, 1998.
105. SHAIKH, Faiz Uddin Ahmed. Tensile and flexural behaviour of recycled polyethylene terephthalate (PET) fibre reinforced geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 245, p. 118438, 2020.
106. SHI, Sheldon Q. et al. Comparative life-cycle assessment of water supply pipes made from bamboo vs. polyvinyl chloride. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118172, 2019.
107. Takuya, Y., Kojiro K., Seiichi O. Heat insulating structure. **JP2010216223A**. Japan. 2009.
108. TRIPPE, Anthony. Guidelines for preparing patent landscape reports. **Patent landscape reports**. Geneva: WIPO, p. 2015, 2015.
109. TUNC, Esra Tugrul. Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. **Journal of environmental management**, v. 231, p. 86-97, 2019.
110. USMAN, Aliyu et al. Irradiated polyethylene terephthalate fiber and binder contents optimization for fiber-reinforced asphalt mix using response surface methodology. **Ain Shams Engineering Journal**, 2020.
111. VALERIO, Oscar; MUTHURAJ, Rajendran; CODOU, Amandine. Strategies for polymer to polymer recycling from waste: Current trends and opportunities for improving the circular economy of polymers in South America. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, p. 100381, 2020.
112. VENKATESAN, Raja; ZHANG, Yichuan; CHEN, Guangming. Preparation of poly (butylene adipate-co-terephthalate)/ZnSnO<sub>3</sub> composites with enhanced antimicrobial activity. **Composites Communications**, v. 22, p. 100469, 2020.
113. WANG, Xin et al. High-performance composite bridge deck with prestressed basalt fiber-reinforced polymer shell and concrete. **Engineering Structures**, v. 201, p. 109852, 2019.
114. WIPO - World Intellectual Property Organization. World Intellectual Property Indicators [Internet]. 2019. Available online: [http://www.wipoint/export/sites/www/freepublications/en/intproperty/941/wipo\\_pub\\_941\\_2013pdf](http://www.wipoint/export/sites/www/freepublications/en/intproperty/941/wipo_pub_941_2013pdf), 2019. (accessed on 01/07/2020).
115. XUE, Yongchao; QIAN, Zhendong. Development and performance evaluation of epoxy asphalt concrete modified with mineral fiber. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 378-383, 2016.
116. YAMADA, K. MAT. European Patent Office. **EP2735251B1**. 2012
117. YANG, Xiao et al. Dynamic and fatigue performances of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites. **Composite Structures**, v. 138, p. 227-236, 2016.

118. YANG, Yue-Chao et al. Fabrication of antimicrobial composite films based on xylan from pulping process for food packaging. **International journal of biological macromolecules**, v. 134, p. 122-130, 2019.
119. YIN, JiMing; WU, Wen. Utilization of waste nylon wire in stone matrix asphalt mixtures. **Waste Management**, v. 78, p. 948-954, 2018.
120. ZAFARI, Behrouz; MOTTRAM, J. T. Characterization by full-size testing of pultruded frame joints for the Startlink House. **Journal of Composites for Construction**, v. 19, n. 1, p. 04014033, 2015.
121. ZARATE, C. N.; ARANGUREN, M. I.; REBOREDO, M. M. Influence of fiber volume fraction and aspect ratio in resol-sisal composites. **Journal of applied polymer science**, v. 89, n. 10, p. 2714-2722, 2003.
122. Zeng, Y., Maxwell, S., Runtig, R.K. *et al.* Environmental destruction not avoided with the Sustainable Development Goals. **Nat Sustain** (2020).
123. ZHAO, Xiao-Ling et al. Effect of dynamic loading and environmental conditions on the bond between CFRP and steel: state-of-the-art review. **Journal of Composites for Construction**, v. 18, n. 3, p. A4013005, 2014.
124. Zhou, Y, Stanchev, P, Katsou, E, Awad, S, Fan, M. A circular economy use of recovered sludge cellulose in wood plastic composite production: Recycling and eco-efficiency assessment. **Waste Management**, 2019, 99, 42-48.
125. ZHU, Dian et al. Fiber reinforced composites sandwich panels with web reinforced wood core for building floor applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 150, p. 196-211, 2018.