

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DO RIO GRANDE DO NORTE

YLDENEY SILVA DOMINGOS

AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO AMBIENTAL DO COMPÓSITO POLIMÉRICO  
NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DO SISTEMA CENTRAL DE  
NATAL - RN - BRASIL

NATAL-RN

2017

YLDENEY SILVA DOMINGOS

AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO AMBIENTAL DO COMPÓSITO POLIMÉRICO  
NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DO SISTEMA CENTRAL DE  
NATAL - RN - BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais (PPgUSRN), do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, na linha de Saneamento Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. D.ra Renata Carla Tavares dos Santos Felipe

NATAL-RN

2017

Domingos, Yideney Silva.

D671a Avaliação do envelhecimento ambiental do compósito polimérico na estação de tratamento de efluentes do sistema central de Natal – RN – Brasil / Yideney Silva Domingos. – 2017.

119 f : il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. D.ra Renata Carla Tavares dos Santos Felipe.

Coorientador(a): Prof.<sup>o</sup> D.r André Luis Calado Araújo.

1. Testes dos materiais. 2. Compósito polimérico. 3. Materiais compósitos – Envelhecimento. 4. Estação de tratamento de efluentes. I. Felipe, Renata Carla Tavares dos Santos. II. Araújo, André Luís Calado. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. IV. Título.

CDU 620.1

YLDENEY SILVA DOMINGOS

AVALIAÇÃO DO ENVELHECIMENTO AMBIENTAL DO COMPÓSITO POLIMÉRICO  
NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DO SISTEMA CENTRAL DE  
NATAL - RN - BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, na linha de Saneamento Ambiental.

Dissertação apresentada e aprovada em 28/07/2017, pela seguinte Banca Examinadora:

BANCA EXAMINADORA



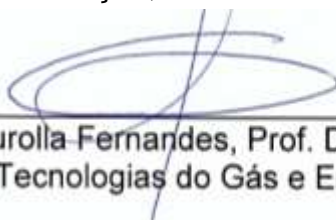
Renata Carla Tavares dos Santos Felipe, Prof. D.ra. – Presidente  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



André Luis Calado Araújo, Prof. D.r. – Examinador interno  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Raimundo Nonato Barbosa Felipe, Prof. D.r. – Examinador Externo  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte



Glauber José Turolla Fernandes, Prof. D.r – Examinador Externo  
Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis

Dedico este trabalho a minha mãe, ela que me inspira a sempre superar todos os desafios com garra, fé, dedicação e amor. Esta pequena vitória é uma das primeiras de muitas que iremos conquistar juntas.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, meu infinito agradecimento. Eles que sempre acreditaram em minha capacidade e me ensinaram a sempre dar o melhor de mim. Obrigada pelo amor incondicional.

A David Emanuel, pelo apoio ao longo de toda minha vida. Sempre ao meu lado, me incentivando e me fazendo acreditar que posso mais do que imagino.

A minha orientadora, D.ra Renata Carla Tavares dos Santos Felipe, pelos incontáveis ensinamentos acadêmicos e pessoais. Ela que muitas vezes não foi somente orientadora, mas, em alguns momentos, foi conselheira, confidente, mãe e amiga. Obrigada por estar ao meu lado.

Ao meu co-orientador, D.r André Luis Calado Araújo pelo incentivo e apoio na realização deste trabalho.

Ao professor D.r Raimundo Nonato Barbosa Felipe pelo apoio e contribuições.

Ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais (PPgUSRN) do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).

Ao Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER) pela liberação e autorização que possibilitou o ingresso no mestrado em Uso Sustentável de Recursos Naturais.

Aos amigos do Laboratório de Química Ambiental, pela amizade e companheirismo.

Aos amigos Rafaela, Jilliano, Lindomar, Aline e Marciellen pelo auxílio na confecção e polimento dos corpos de prova.

Ao D.r Glauber José Turrola Fernandes por sempre incentivar e participar da minha busca por qualificação acadêmica.

A D.ra Juliana Delgado Tinôco pela liberação e acesso a Estação de tratamento de efluentes, bem como a todos os operadores que me auxiliaram durante as coletas do efluente nesta estação.

A Angélica Gilksana e a Francisco Antônio do Laboratório de Materiais do CTGAS-ER, bem como a Bruna Araújo do IFRN, pela realização dos ensaios de Microscopia eletrônica de varredura.

Ao Núcleo de Análises de Águas, Alimentos e Efluentes (NAAE), em especial a Douglisnilson de Moraes, pela realização de alguns ensaios nas amostras de efluente.

A todos os amigos do mestrado em Uso Sustentável de Recursos Naturais do IFRN pela alegria e momentos únicos compartilhados.

## RESUMO

A utilização de compósitos apresenta-se como uma alternativa estrutural que proporciona vantagens mecânicas, quando comparados aos materiais de construção mais tradicionais como concreto e aço. Os compósitos poliméricos quando expostos a condições adversas, tais como, radiação ultravioleta, altas temperaturas, agentes oxidantes e umidade excessiva resultam em alterações das características físicas e no seu comportamento mecânico, dependendo do período de exposição e das condições de serviço. Dessa maneira, o trabalho apresenta uma avaliação do comportamento mecânico e físico do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro do tipo E (PRFV) quando exposto a agentes do envelhecimento ambiental na Estação de tratamento de efluentes do Sistema Central de Natal-RN, também conhecida como ETE do Baldo. O compósito foi confeccionado pelo processo de laminação manual (*hand lay-up*) e os corpos de prova (CP) conforme as normas ASTM D3039-14 e ASTM D790-10 para os ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos, respectivamente, onde estes foram expostos por um período de 08 (oito) meses, acondicionados acima e imersos ao efluente. Além disso, foi realizada a caracterização físico-química do efluente, para a avaliação dos seguintes parâmetros: pH, condutividade, sulfato, alcalinidade, acidez, sulfeto e temperatura, objetivando caracterizar as condições do efluente em contato direto e indiretamente com o compósito. Após o período de exposição foram realizados os ensaios para avaliação morfológica, avaliação da integridade estrutural, avaliação do desempenho mecânico e para a caracterização da fratura do compósito polimérico, e assim realizou-se uma comparação das características mecânicas do mesmo, no estado original e no estado envelhecido (pós exposição na ETE). O compósito polimérico estudado mostrou-se estável após o período de envelhecimento, com pouca variação de massa e leves alterações na sua coloração. As propriedades mecânicas avaliadas também não tiveram significativas alterações durante o período estudado, mostrando assim que o PRFV apresenta potencial de utilização em ambientes agressivos como em estações de tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Compósito polimérico. Envelhecimento ambiental. Estação de tratamento de efluentes. Comportamento mecânico.



## ABSTRACT

The use of composites presents a structural alternative that provides mechanical advantages when compared to more traditional building materials such as concrete and steel. Polymer composites, when exposed to adverse conditions such as ultraviolet radiation, high temperatures, oxidizing agents and excessive moisture, result in changes in physical characteristics and in their mechanical behavior, depending on the period of exposure and the conditions of service. Thus, the present work presents an evaluation of the mechanical and physical behavior of the fiber glass type E reinforced polymer composite (FGRP) when exposed to agents of environmental aging at the effluent treatment plant of the Central System of Natal-RN, also known as ETE do Baldo. The composite was made by the hand lay-up method and the test bodies (TB) according to ASTM D3039-14 and ASTM D790-10 standards for the uniaxial tensile and three-point bending tests, respectively, where these were exposed for a period of 08 (eight) months, conditioned above and immersed in the effluent. In addition, the physical-chemical characterization of the effluent was carried out to evaluate the following parameters: pH, conductivity, sulfate, alkalinity, acidity, sulfide and temperature, aiming at characterizing the effluent conditions in direct and indirect contact with the composite. After the exposure period, tests were carried out for morphological evaluation, evaluation of the structural integrity, evaluation of the mechanical performance and of the characterization of the fracture of the polymer composite, and thus a comparison was made between the mechanical characteristics of the fracture of the polymer composite in the original state with that of the aged state (post exposure in ETE). The polymer composite studied proved to be stable after the aging period with little variation of mass and slight changes in its coloration. The mechanical properties evaluated also did not have significant changes during the studied period, thus showing that the FGRP presents the potential of being used in aggressive environments such as in effluent treatment plants.

Keywords: Polymer composite. Environmental aging. Effluent treatment plant.  
Mechanical behavior.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Composição e propriedades das fibras de vidro. ....	35
Quadro 2 - Características dos modos de falhas. ....	38
Quadro 3 - Ensaios, métodos, técnicas de análise e equipamentos utilizados para caracterização do efluente. ....	68
Quadro 4 - Mecanismos de danos encontrados nos PRFV após o ensaio de tração uniaxial. ....	106
Quadro 5 - Mecanismos de danos encontrados nos PRFV após o ensaio de flexão em três pontos.....	113
Figura 1 - Dano sofrido pela estrutura em concreto armado da ETE do Sistema Central de Natal.....	23
Figura 2 - Classificação geral dos compósitos quanto a matriz e ao reforço.....	27
Figura 3 - Módulo de elasticidade x peso específico dos materiais.....	28
Figura 4 - Classificação das matrizes poliméricas.....	30
Figura 5 - Reação de esterificação esquemática .....	31
Figura 6 - Esquema das reações durante o processo de cura da resina de poliéster insaturado.....	32
Figura 7 - Classificação dos compósitos poliméricos quanto ao reforço .....	33
Figura 8 – Manta de fibra de vidro.....	36
Figura 9 - Laminação manual (Hand Lay-up).....	37
Figura 10 - Classificação da fratura segundo ASTM D3039-14. ....	38
Figura 11- Principais danos em compósitos laminados .....	39
Figura 12 - Fluxograma dos ensaios realizados no compósito e no efluente .....	58
Figura 13 - Estação de tratamento de efluentes do Sistema Central de Natal/RN....	59
Figura 14 - Vista aérea da ETE do Sistema Central de Natal/RN. ....	60
Figura 15 - Esquema representativo de uma das duas linhas de tratamento da ETE do Sistema Central de Natal.....	61
Figura 16 - Processos de tratamentos do efluente na ETE do Sistema Central de Natal. ....	62
Figura 17 - Vertedouro pós reator UASB, onde foram expostos os CP. ....	63
Figura 18 - Vista superior dos reatores UASB.....	64

Figura 19 - Processo de fabricação do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro tipo E. ....	64
Figura 20 - Configuração do compósito. ....	65
Figura 21 - Corpos de prova a) para o ensaio de densidade, b) para o ensaio de flexão em três pontos e c) para o ensaio de tração uniaxial. ....	66
Figura 22 - Exposição dos CP de PRFV. ....	67
Figura 23 – Pesagem do CP para o ensaio de densidade do compósito. ....	69
Figura 24 - Máquina de ensaio universal mecânico, com garras para o ensaio de tração uniaxial. ....	73
Figura 25 - Máquina de ensaio universal mecânico, com garras para o ensaio de flexão em três pontos.....	75
Figura 26 - Condutividade do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.	78
Figura 27 - pH do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV. ....	78
Figura 28 - Temperatura do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV. ...	79
Figura 29 - Alcalinidade total do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV. ....	80
Figura 30 - Acidez do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.....	80
Figura 31 - Concentração de sulfato do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.....	81
Figura 32 - Concentração de sulfeto do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.....	81
Figura 33 - Superfície do corpo de prova no estado original. ....	85
Figura 34 - Superfície do corpo de prova envelhecido por 4 meses acima do efluente. ....	86
Figura 35 - Superfície do corpo de prova envelhecido por 4 meses, imerso no efluente. ....	87
Figura 36 - Superfície do corpo de prova envelhecido por 8 meses, acima do efluente. ....	88
Figura 37 - Superfície do corpo de prova envelhecido por 8 meses, imerso no efluente. ....	89
Figura 38 - Variação de massa do PRFV acima do efluente.....	90
Figura 39 - Variação de massa do PRFV imerso no efluente.....	90
Figura 40 - CP retirados após 8 meses de exposição a) acima do efluente; b) imerso no efluente.....	91

Figura 41 - Ensaio de tração uniaxial no PRFV no estado original. ....	93
Figura 42 - Ensaio de tração uniaxial no PRFV envelhecido durante 4 meses a) acima do efluente; b) imerso no efluente. ....	94
Figura 43 - Ensaio de tração uniaxial no PRFV envelhecido durante 8 meses a) acima do efluente; b) imerso no efluente. ....	95
Figura 44 - Ensaio de flexão em três pontos no PRFV no estado original. ....	97
Figura 45 - Ensaio deflexão em três pontos no PRFV envelhecido durante 4 meses a) acima do efluente; b) imerso no efluente. ....	98
Figura 46 - Ensaio deflexão em três pontos no PRFV envelhecido durante 8 meses a) acima no efluente b) imerso ao efluente. ....	99
Figura 47 - Fraturas dos PRFV após o ensaio de tração uniaxial, a) Estado original; b) Exposto por 4 meses, 1 - Acima do efluente, 2 - Imerso ao efluente; c) Exposto por 8 meses, 1 - Acima do efluente exposto, 2 - Imerso ao efluente.....	100
Figura 48 – Característica da fratura final do CP original - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura. ....	101
Figura 49 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 4 meses - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura.....	102
Figura 50 - Característica da fratura final do CP imerso no efluente após 4 meses - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura.....	103
Figura 51 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 8 meses - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura.....	104
Figura 52 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 8 meses - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura.....	105
Figura 53 - Fraturas dos PRFV após o ensaio de flexão em três pontos a) Estado original; b) Exposto por 4 meses, 1 - Acima do efluente, 2 - Imerso ao efluente; c) Exposto por 8 meses, 1 - Acima do efluente exposto, 2 - Imerso ao efluente.....	107
Figura 54 - Característica da fratura final do CP original - Ensaio de flexão. (a) Região de compressão do CP (b) Região lateral da fratura. ....	108

Figura 55 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 4 meses - Ensaio de flexão. (a) Região lateral do CP (b) Região lateral da fratura. ....	109
Figura 56 - Característica da fratura final do CP imerso no efluente após 4 meses - Ensaio de flexão. (a) Região lateral do CP (b) Região lateral da fratura. ....	110
Figura 57 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 8 meses - Ensaio de flexão. (a) Região lateral do CP (b) Região lateral da fratura. ....	111
Figura 58 - Característica da fratura final do CP imerso no efluente após 8 meses - Ensaio de flexão. (a) Região lateral do CP (b) Região lateral da fratura. ....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de diferentes lâminas de compósitos poliméricos em função da orientação das fibras .....	28
Tabela 2 - Caracterização média do efluente da ETE do Sistema Central de Natal/RN. ....	77
Tabela 3 - Frações volumétricas de reforço, vazios e matriz do PRFV.....	82
Tabela 4 - Análise da superfície do PRFV. ....	83
Tabela 5 - Concentração mássica do material incrustado nas paredes de concreto da ETE. ....	91
Tabela 6 - Propriedades de tração uniaxial do PRFV acima do efluente. ....	92
Tabela 7 - Propriedades de tração uniaxial do PRFV imerso no efluente. ....	93
Tabela 8 - Propriedades de flexão em três pontos do PRFV acima do efluente. ....	96
Tabela 9 - Propriedades de flexão em três pontos do PRFV imerso no efluente. ....	96

## LISTA DE SIGLAS

CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Estado do Rio Grande do Norte
CP	Corpo (s) de Prova (s)
PRFV	Compósito Polimérico Reforçado com Fibra de Vidro
CTGAS-ER	Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
GPa	Gigapascal
IFRN	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Megapascal
NAAE	Núcleo de Análises de Águas, Alimentos e Efluentes
pH	Potencial hidrogeniônico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
TMVM	Técnica de Medição de Variação de Massa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>23</b>
3.1	OBJETIVO GERAL	23
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>24</b>
4.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	25
4.2	APLICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	26
4.3	CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	27
<b>4.3.1</b>	<b>Matriz polimérica</b>	<b>29</b>
4.3.1.1	Resina poliéster insaturada	30
<b>4.3.2</b>	<b>Reforço fibrosos</b>	<b>32</b>
4.3.2.1	Fibra de Vidro	34
4.4	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	36
4.5	MECANISMO DE DANO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	37
4.6	ENVELHECIMENTO NOS MATERIAIS COMPÓSITOS	40
<b>4.6.1</b>	<b>Temperatura</b>	<b>41</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Oxidação</b>	<b>45</b>
<b>4.6.3</b>	<b>Radiação ultravioleta (UV)</b>	<b>47</b>
<b>4.6.4</b>	<b>Umidade</b>	<b>50</b>
<b>4.6.5</b>	<b>Combinação dos agentes de envelhecimento ambiental em compósitos</b>	<b>51</b>
4.7	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	55
4.8	PARÂMETROS QUE PODEM DETERIORAR O CONCRETO	56
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>57</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DO SISTEMA CENTRAL DE NATAL	58
5.2	CONFECÇÃO DO COMPÓSITO	64



		18
5.3	OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	65
5.4	ENSAIOS NO EFLUENTE	67
5.5	CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO LAMINADO	68
<b>5.5.1</b>	<b>Densidade volumétrica do PRFV</b>	69
<b>5.5.2</b>	<b>Determinação das frações volumétricas de reforço, matriz e teores de vazios do PRFV</b>	70
5.5.2.1	Calcinação	70
5.6	MECANISMO DE ENVELHECIMENTO	71
<b>5.6.1</b>	<b>Avaliação morfológica do PRFV</b>	71
5.6.1.1	Scanner	72
5.6.1.2	Microscopia eletrônica de varredura	72
<b>5.6.2</b>	<b>Avaliação da integridade estrutural do PRFV</b>	72
5.6.2.1	Técnica de medição da variação de massa (TMVM)	72
<b>5.6.3</b>	<b>Desempenho mecânico do PRFV</b>	73
5.6.3.1	Ensaio de tração uniaxial	73
5.6.3.2	Ensaio de flexão em três pontos	74
<b>5.6.4</b>	<b>Caracterização da fratura do PRFV</b>	76
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	76
6.1	ANÁLISE DO EFLUENTE DO UASB	76
6.2	ANÁLISE DO COMPÓSITO	82
<b>6.2.1</b>	<b>Caracterização do compósito</b>	82
<b>6.2.2</b>	<b>Avaliação morfológica</b>	82
6.2.2.1	Análise da superfície do PRFV	84
6.2.2.2	Análise da superfície do PRFV após 4 meses de exposição	85
6.2.2.2.1	<i>Acima do efluente</i>	85
6.2.2.2.2	<i>Imerso no efluente</i>	86
6.2.2.3	Análise da superfície do PRFV após 8 meses de exposição	87
6.2.2.3.1	<i>Acima do efluente</i>	87
6.2.2.3.2	<i>Imerso no efluente</i>	88

	19
<b>6.2.3 Avaliação da Instabilidade Estrutural</b>	90
<b>6.2.4 Avaliação do desempenho mecânico</b>	91
6.2.4.1 Ensaio de tração uniaxial	91
6.2.4.2 Ensaio de Flexão em três pontos	95
<b>6.2.1 Caracterização da fratura final</b>	100
6.2.1.1 Ensaio de tração Uniaxial	100
6.2.1.2 Ensaio de flexão em três pontos	106
<b>7 CONCLUSÕES</b>	113
<b>8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	115
<b>ANEXO A – SUBMISSÃO DO ARTIGO NA REVISTA ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL</b>	122

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização dos recursos naturais de forma sustentável é um desafio da humanidade. Esta ideia tornou-se bastante discutida, fruto da percepção de uma crise ambiental global. A sustentabilidade, segundo Mikhailova (2004, p. 28), relaciona-se à quantidade de consumo que pode continuar indefinidamente, sem degradar as reservas existentes.

De acordo com a Organização das Nações Unidas (2015, p. 1) o desenvolvimento sustentável é o “modelo de desenvolvimento que satisfaz as necessidades das gerações presentes sem afetar a capacidade de gerações futuras de também satisfazer suas próprias necessidades”.

A água como um recurso natural limitado que é, deve ser utilizada de maneira sustentável. Desse modo, a coleta de efluentes, bem como, o tratamento adequado dos mesmos, devem ser efetivos, pois se isto não ocorrer poderá levar a cenários de poluição ambiental, o que acarretará em danos às gerações futuras.

A utilização de estações de tratamento de efluentes (ETE), que são sistemas que objetivam realizar o tratamento do esgoto bruto com o intuito de torná-lo adequado para seu lançamento em corpos hídricos, atendendo aos níveis que a legislação ambiental exige, faz-se necessário.

Os sistemas de saneamento são estruturas hidráulicas, normalmente construídas de concreto, e que estão em constante contato com o efluente, por isso são submetidas a diferentes mecanismos de agressão. Os materiais utilizados nas ETE sofrem bastante a ação do meio (degradação ambiental), uma vez que ficam expostos a atmosferas que podem comprometer suas características, podendo até modificar suas propriedades mecânicas, físicas e químicas. (SOUZA et al, 2016).

O concreto é um material que, em determinados ambientes torna-se muito suscetível a vários tipos de danos, como acontece em estações de tratamento de efluentes, como afirmam Rheinheimer e Khoe (2013). Isso deve-se ao fato de que o esgoto é um fluido de características complexas, que pode reagir e levar à formação de compostos nocivos ao concreto. Um dos principais danos que podem ocorrer ao concreto em uma ETE é ocasionado por sulfatos, que resulta em degradação acelerada do concreto, com grandes prejuízos à sua estrutura.

Os mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas que utilizam concreto, são a lixiviação, a expansão por sulfato, as reações álcali-agregado,

despassivação por carbonatação, a despassivação por ação de cloretos e a agressividade ambiental. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes químicos e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV, que necessitam de revestimentos especiais, pois é considerado como grau de agressividade muito forte. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Em condições de exposição adversas, devem ser tomadas medidas especiais de proteção e conservação nas estruturas, que de acordo com a ABNT - NBR 6118/2014 podem ser aplicação de revestimentos hidrofugantes, pinturas impermeabilizantes sobre as superfícies do concreto, revestimentos de argamassas, de cerâmicas ou outros sobre a superfície do concreto, além da galvanização e proteção catódica da armadura, entre outros.

Dessa forma, é necessário que as ETE utilizem tecnologias em seus processos que garantam a qualidade dos efluentes, tanto para reuso como para lançamento em corpos d'água. O tratamento adequado de esgoto, seja para a obtenção de efluentes que atendam aos padrões de lançamento do corpo receptor, seja para a sua utilização produtiva, representa solução para os problemas de poluição da água e de escassez de recursos hídricos, contribuindo para a proteção ambiental e para a geração de alimentos e de outros produtos. (MOTA; SPERLING, 2009, p. 21).

Uma das Estações de tratamento de esgoto mais conhecida do Estado Rio Grande do Norte é a do Sistema Central de Natal, localizada no bairro do Alecrim, na Rua Capitão Silveira Barreto S/N, na cidade do Natal, Estado do Rio Grande do Norte. Essa ETE possui capacidade para tratar em média 450 litros por segundo e teve sua operação inicializada em março de 2010. Essa obra em associação a outras, contribui para que a cidade Natal passasse de 30% para 60% de cobertura de coleta e tratamento de esgotos da cidade. (RIO GRANDE DO NORTE, 2016).

Essa ETE, construída em concreto armado, trata o esgoto vindo de 21 bairros da cidade do Natal (RIO GRANDE DO NORTE, 2016). Porém foi observado que algumas estruturas de concreto já apresentam efeitos do processo de degradação estrutural, em apenas seis anos de operação.

É sabido que o uso de materiais não duráveis em sistemas de tratamento de efluentes, pode causar muitos problemas, como investimento com reparos, parada no sistema de tratamento e a poluição da área em que a estação de tratamento está localizada. A poluição pode ocorrer neste caso, de vários modos como: poluição térmica, poluição química, poluição física e biológica.

Com o avanço da ciência dos materiais, impulsionado pela demanda de materiais mais leves, duráveis e resistentes, surgiram os materiais compósitos, segundo Carneiro e Teixeira (2008). Dentre os tipos de compósitos, os poliméricos possuem versatilidade em seu uso, pois atendem a diversas áreas. José et al. (2012) destacam a aplicabilidade dos compósitos poliméricos para a indústria aeronáutica, aeroespacial, militar, naval, automobilística, de materiais esportivos, biomédicas e química.

A partir da década de 90, a indústria da construção civil também passou a empregá-los, tendo em vista a sua versatilidade, leveza e facilidade de montagem, além de suas elevadas resistências específicas. Os compósitos poliméricos podem ser utilizados para reparo e reforço de estruturas convencionais de concreto e também no projeto de estruturas novas (CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008).

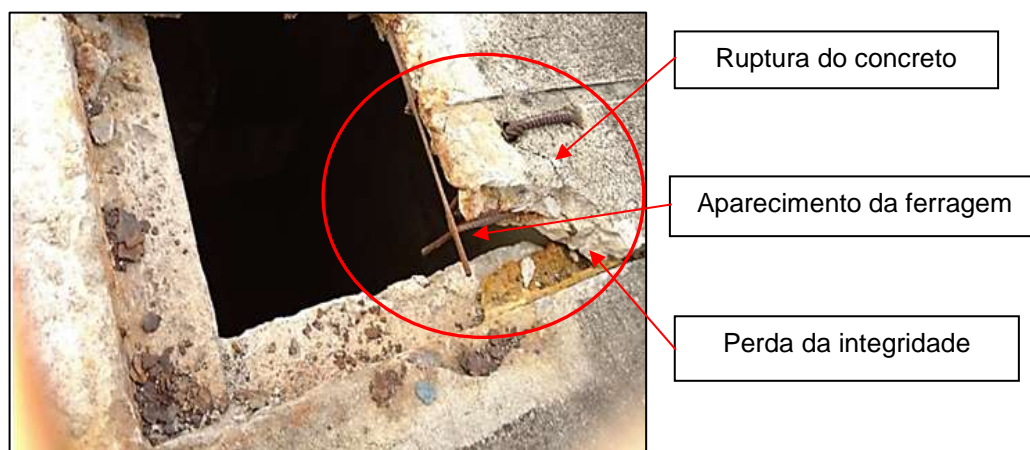
Dessa forma, esta dissertação visa avaliar o comportamento mecânico e físico do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro (PRFV), quando exposto aos agentes de envelhecimento na Estação de Tratamento de Efluentes do Sistema Central de Natal-RN (ETE do Baldo). Com isso, serão avaliadas e comparadas as propriedades mecânicas de tração uniaxial e flexão em três pontos, além das propriedades físicas do compósito PRFV no estado original, e após a exposição por um período de oito meses na ETE, com a finalidade de analisar aplicabilidade deste material na respectiva estação. Parte desse estudo resultou na apresentação de um artigo científico que foi submetido para publicação na Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, ISSN 1809-4457, classificada como A2 na área de Ciências Ambientais, conforme anexo A.

## **2 JUSTIFICATIVA**

As Estações de tratamento de efluentes normalmente, são construídas em concreto armado. No entanto, ao longo do tempo, essas estruturas sofrem o processo de degradação, ou mesmo de perda da integridade estrutural, que podem no futuro

ocasionar um dano ambiental. Essa degradação é provocada pela permeação de gases e outros agentes, que através do mecanismo de capilaridade permeiam o concreto, ocasionando dano na estrutura. O objeto de estudo foi a Estação de tratamento do Sistema Central de Natal que apresenta, após sete anos de uso, processo de degradação estrutural conforme Figura 1.

Figura 1 - Dano sofrido pela estrutura em concreto armado da ETE do Sistema Central de Natal



Fonte: Elaborado pela autora do trabalho (2016).

Diante disso, foi analisado um novo material, o compósito polimérico reforçado com fibra de vidro do tipo E, buscando avaliar o seu comportamento mecânico e físico quando em contato com o efluente dessa ETE.

### 3 OBJETIVOS

Abaixo serão apresentados o objetivo geral e específicos deste trabalho.

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento mecânico e físico do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro E (PRFV), quando exposto aos agentes de envelhecimento ambiental na Estação de tratamento de efluente do Sistema Central de Natal/RN.

### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Confeccionar um compósito polimérico reforçado com três camadas de fibra de vidro tipo E, utilizando a técnica de laminação manual (*hand lay-up*).
- Fabricar corpos de prova (CP) para a realização dos ensaios de: tração uniaxial e flexão em três pontos, conforme as normas ASTM D3039-14 e D790-10, respectivamente.
- Caracterizar o PRFV através do ensaio de caracterização microestrutural, mediante a norma ASTM D3171-15.
- Determinar as propriedades mecânicas de resistência, deformação e módulo de elasticidade à tração uniaxial e à flexão em três pontos, no compósito em seu estado original (EO).
- Expor os CP confeccionados a partir do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro (PRFV) na Estação de Efluentes do Sistema Central de Natal por quatro e oito meses.
- Caracterizar o efluente da ETE que terá contato direto e indireto com o compósito, através de ensaios físico-químicos.
- Estudar a influência do envelhecimento ambiental através da análise morfológica da superfície e da instabilidade estrutural mediante a variação de massa e espessura do compósito exposto na ETE.
- Analisar o comportamento mecânico do compósito após os períodos de exposição no efluente.
- Realizar análises microscópicas e macroscópicas das características de fratura final nos CP antes e após a exposição na ETE.
- Comparar o comportamento mecânico (fratura final, análise morfológica da superfície e instabilidade estrutural) para a condição original e após a exposição.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os conceitos que fundamentam teoricamente esta pesquisa. Dessa maneira, são explorados os conceitos de compósito, suas aplicações e propriedades, estações de tratamento de efluentes, envelhecimento ambiental e os principais agentes de envelhecimento ambiental.

#### 4.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

O desenvolvimento de novas tecnologias e o uso de materiais que venham a apresentar um bom desempenho mecânico ou processos que tragam inovação tecnológica, bem como, a redução nos custos de insumos e do impacto ambiental vem sendo exigido na atualidade. Portanto, a seleção de materiais que atendam a estes requisitos e que apresentam características como alta relação específica peso/resistência como observado nos materiais compósitos. (FELIPE, 2012a; RODA, 2016).

A utilização de materiais que apresentem uma maior resistência, vem sendo bastante estudada. Dentre os novos materiais pode-se destacar os compósitos, que segundo a *American Society for Testing and Materials - ASTM D3878* (2015, p. 1) é um material composto por dois ou mais materiais, insolúveis um no outro, os quais são combinados para formar um novo material com propriedades distintas dos materiais que lhes deram origem.

Mendonça (2005) define um material compósito como um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresentam.

Os compósitos apresentam uma fase contínua e outra descontínua. A fase contínua é matriz e a descontínua é o reforço. Estas fases distintas apresentam uma nítida diferença entre as propriedades físicas e químicas, ou seja, os compósitos possuem uma interface bem definida em escala macroscópica que possibilita a diferenciação dos constituintes dos materiais. (MARINUCCI, 2011).

Segundo Marinucci, (2012, p. 7) os compósitos são materiais que apresentam dois ou mais componentes quimicamente diferentes, denominados de matriz e fibra, que na escala microscópica mostra uma interface bem definida separando os elementos constituintes que formam o material. As matrizes têm como função principal, transferir as solicitações mecânicas ao reforço e protegê-los do ambiente externo.

Carneiro e Teixeira (2008) definem que os materiais compósitos poliméricos, são compostos, por fibras de elevada resistência envolvidas numa matriz polimérica (resina). Esses materiais podem ter comportamento anisotrópico, ortotrópico ou quase



isotrópico, dependendo do tipo e das direções preferenciais das fibras, que são os componentes mais resistentes e rígidos do compósito.

Como os componentes dos compósitos podem ser diferenciados em escala macroscópica, tal fato já os diferencia das ligas, por exemplo, que são combinações de diferentes materiais, em escala atômica, ou seja, há ligações químicas do tipo metálica resultante da interação entre dois ou mais metais, as vezes até entre não-metais e metais. Já nos materiais compósitos, a escala de dimensões das interações é da ordem de um micrometro ou maior.

## 4.2 APLICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

O objetivo do uso de materiais compósitos é a combinação de reforços e matrizes, visando a produção de material com características superiores aos seus componentes iniciais. As propriedades dos compósitos, tais como, propriedades da matriz, do reforço, a concentração volumétrica, a interface e a adesão fibra/matriz, disposição das camadas dentre outras, são diretamente relacionadas as propriedades dos componentes que lhes deram origem. (MARINUCCI, 2011).

Os compósitos, especialmente os PRFV, que são utilizados em barcos de passeios, pranchas de surf, em asas e outros componentes de aviões, também podem ser utilizados com finalidades estruturais na construção civil, em que os materiais tradicionais apresentam dificuldades de utilização devido ao alto peso e baixa durabilidade.

As vantagens do uso PRFV, basicamente, estão relacionados ao elevado desempenho mecânico, maiores velocidades de construção permitida devido ao fácil manuseio, alta resistência à corrosão, elevada durabilidade, menores custos de ciclo de vida e alto custo-benefício, dentre outros. (TECHCOMPOSITES, 2016).

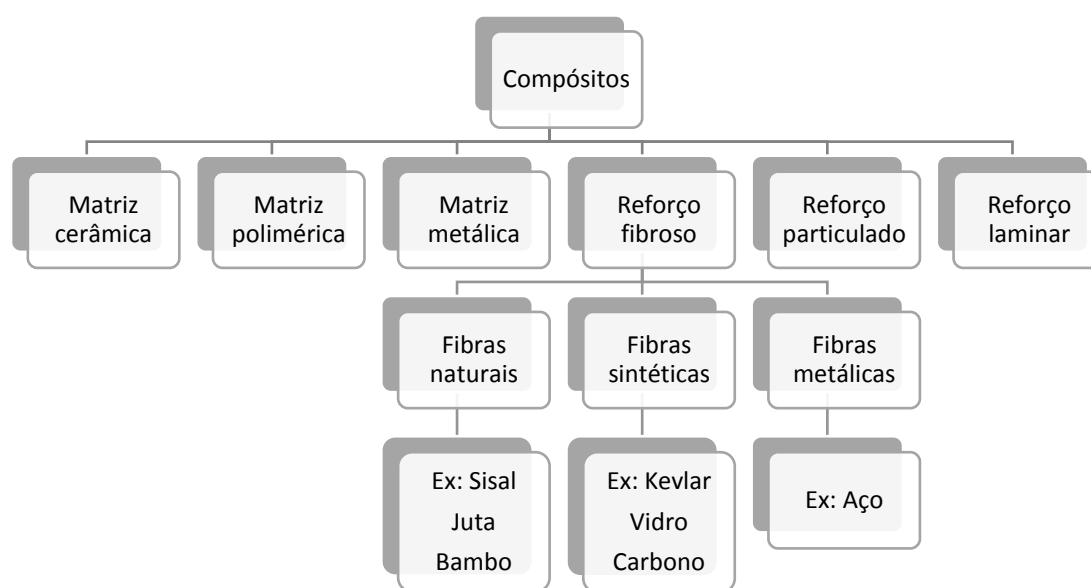
Os materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras apresentam vantagens quando comparados aos materiais de construção mais tradicionais como concreto e aço, como baixo peso e boa resistência a corrosão, por exemplo. Por outro lado, devido ao fato desses materiais serem relativamente recentes no mercado, questões a respeito de sua durabilidade são ainda objeto de discussão e faz-se necessária pesquisas sobre o comportamento deles em determinadas condições de serviços. Como consequência, tem surgido trabalhos a respeito da degradação deles

considerando efeitos como temperatura, oxidação, radiação UV, condições de carregamento, etc. (OLIVEIRA, 2004).

### 4.3 CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

De acordo com Carneiro e Teixeira (2008, p. 59), com relação as matrizes dos compósitos podemos classificá-las como: compósito de matriz metálica, polimérica, cerâmica e de carbono grafite. As fibras podem ser de diferentes tipos tais como: naturais (sisal, coco, juta, entre outras), sintéticas (nylon, vidro, PVA, polietileno, polipropileno, entre outras) e metálicas (aço), conforme observado na Figura 2.

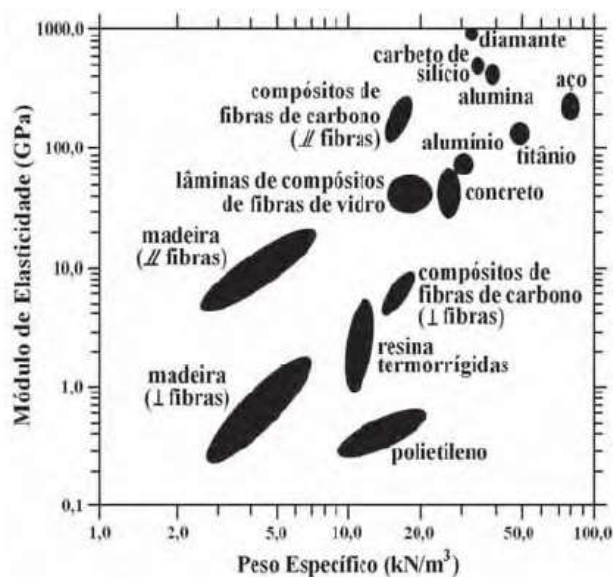
Figura 2 - Classificação geral dos compósitos quanto a matriz e ao reforço



Fonte: Adaptação de Jose, J. P. et al (2012).

Hoje em dia dispõe-se de uma grande variedade de fibras. Essas podem ser classificadas em baixo e alto módulo de elasticidade, sendo que as de baixo módulo pouco acrescentam nas resistências à tração e compressão de compósitos, como pode ser visualizado na Figura 3, podendo ainda diminuir a resistência à compressão quando presente em grandes teores. (CAMPELLO, 2013).

Figura 3 - Módulo de elasticidade x peso específico dos materiais



Fonte: Hull e Clyne (1996).

Na Tabela 1, observa-se algumas propriedades de lâminas de compósitos poliméricos, com 2,5 mm de espessura e percentagem média volumétrica de fibras de 50%, podendo então perceber a influência da orientação das fibras nas respectivas propriedades.

**Tabela 1 - Propriedades de diferentes lâminas de compósitos poliméricos em função da orientação das fibras**

Tipo de Laminas (orientação das fibras)	Resistência a tração (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)		Deformação última (%)
	0°	90°	0°	90°	0°
Carbono (0°)	1020 a 2080	35 a 70	100 a 140	2 a 7	2 a 7
Carbono (0°/90°)	700 a 1020	700 a 1020	55 a 76	55 a 75	55 a 75
Carbono (+45°/-45°)	180 a 280	180 a 280	14 a 28	14 a 28	14 a 28
Vidro (0°)	520 a 1400	35 a 70	20 a 40	2 a 7	2 a 7
Vidro (0°/90°)	520 a 1020	520 a 1020	14 a 34	14 a 35	14 a 35
Vidro (+45°/-45°)	180 a 280	180 a 280	14 a 21	14 a 20	14 a 20
Aramida (0°)	700 a 1720	35 a 70	48 a 68	2 a 7	2 a 7
Aramida (0°/90°)	280 a 550	280 a 550	28 a 34	28 a 35	28 a 35
Aramida (+45°/-45°)	140 a 210	140 a 210	7 a 14	7 a 14	7 a 14

Fonte: Adaptado de ACI 440.2R (2002).

As fibras de vidro, têm como as propriedades mais destacadas: alta resistência à tração, resistente ao calor e ao fogo, resistência química elevada, resistência a umidade, resistência térmica e resistência elétrica. (FELIPE, 2008).

A matriz polimérica dos compósitos pode ser constituída de resinas do tipo termorrígidas, sendo as mais comuns: epóxi, fenol, poliéster, viniléster, poliuretano e silicone, ou do tipo termoplásticas como o polietileno, o poliestireno e o policloreto de polivinila (PVC), como afirmam Carneiro e Teixeira (2008).

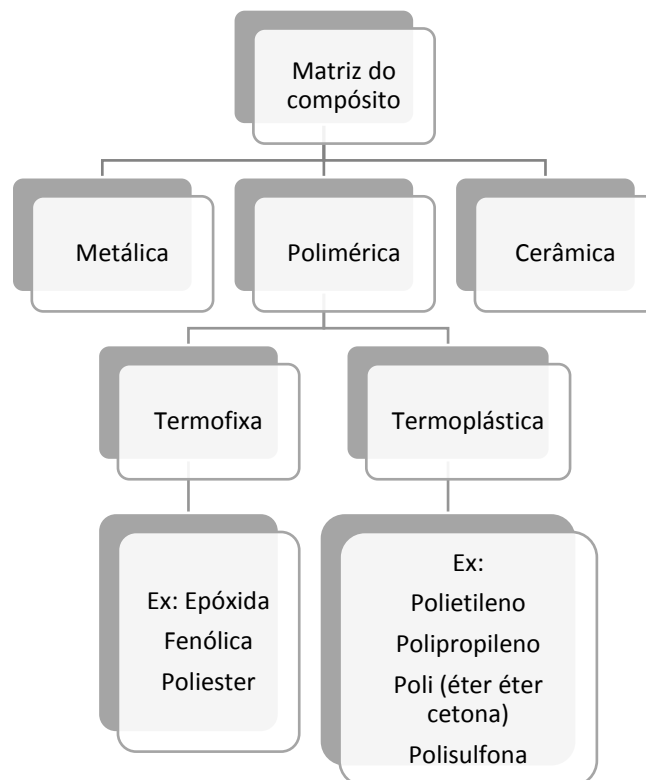
Os materiais compósitos poliméricos fibrosos têm alta resistência específica, alta rigidez específica, conforme Figura 3, e alta resistência a agentes químicos, por isso seu uso, em áreas que sofrem com corrosão e deterioração das estruturas com o passar do tempo, é estimulado. (DOGAN; ATAS, 2015).

#### **4.3.1 Matriz polimérica**

Os materiais poliméricos são materiais orgânicos formados por cadeias carbônicas, que podem conter também átomos de nitrogênio, oxigênio, cloro, flúor e enxofre. As matrizes poliméricas podem ser divididas em termofixas/termorrígidas e termoplásticas. Os polímeros termoplásticos possuem cadeia linear ou ramificada, suas moléculas são fortemente ligadas por forças intramoleculares, mas com fracas interações intermoleculares. Elas podem ser remodeladas por aplicação de calor e pressão e podem apresentar também estruturas semicristalinas ou amorfas. (JOSE *et al.*, 2012; MARINUCCI, 2011).

Os polímeros termofixos ou termorrígidos possuem estruturas reticular com ligações cruzadas do tipo covalente em todas as suas moléculas. Eles não se decompõem com o calor, ou seja, após sua cura eles ficam infusíveis, não podendo ser reciclados. Na Figura 4 está descrito alguns exemplos de polímeros termofixos e termoplásticos.

Figura 4 - Classificação das matrizes poliméricas

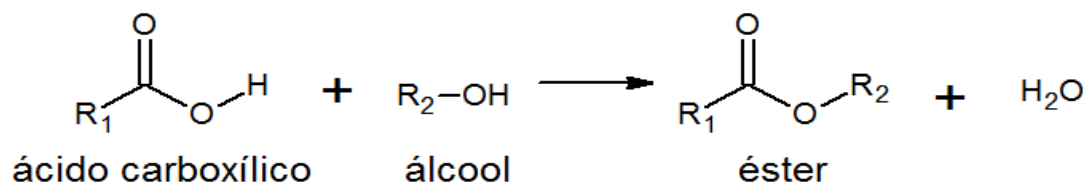


Fonte: Adaptação de Brunelli, (2016).

#### 4.3.1.1 Resina poliéster insaturada

O Poliéster insaturado é um polímero resultante da condensação de diácidos carboxílicos com glicóis e dissolvidos em um monômero reativo, normalmente o monômero de estireno. Ele é obtido através da reação de polimerização por condensação em etapas, Figura 5, entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um biálcool resultando em um produto termofixo. Na polimerização final do poliéster insaturado, as várias moléculas de monômero de estireno, através de suas duplas ligações, se unem com as duplas ligações da base do poliéster, dando origem a um composto reticulado tridimensional sólido e infusível, Figura 6. (PARDINI, LEVY NETO, 2006; EMBRAPOL, 2016)

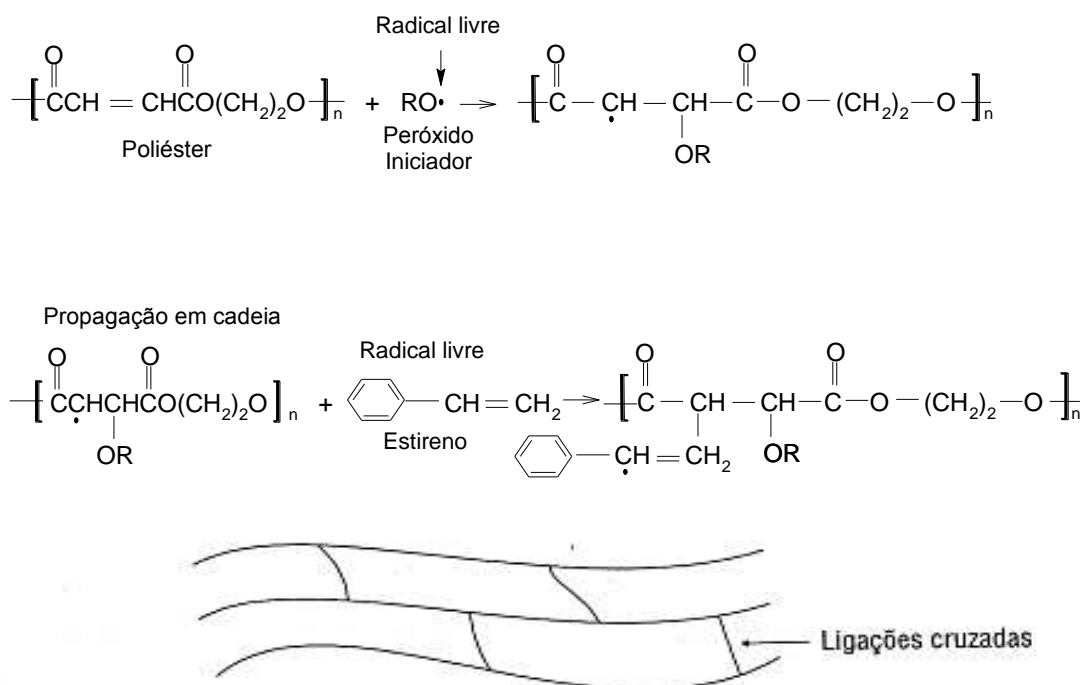
Figura 5 - Reação de esterificação esquemática



Fonte: Embrapol (2016).

A estrutura de um poliéster insaturado é composta geralmente por quatro componentes básicos: ácido saturado (25 a 35% em peso), ácido insaturado (10 a 20% em peso), glicóis (15 a 25% em peso) e monômero (30 a 45% em peso). O glicol fornece grupos OH ao sistema reacional, o ácido saturado, além de determinar o grau de espaçamento das moléculas do ácido insaturado ao longo da cadeia, determina também o tipo de resina. Os ácidos insaturados fornecem as insaturações ao polímero, para a formação do "cross-linking" ou retículo tridimensional, e os monômeros são responsáveis pela copolimerização com os pontos de insaturação presentes na cadeia linear do poliéster, formando uma ponte entre as mesmas, porém, antes desta interligação ou cura, o monômero tem a função de solvente. (EMBRAPOL, 2016).

Figura 6 - Esquema das reações durante o processo de cura da resina de poliéster insaturado



Fonte: Pardinni (2006).

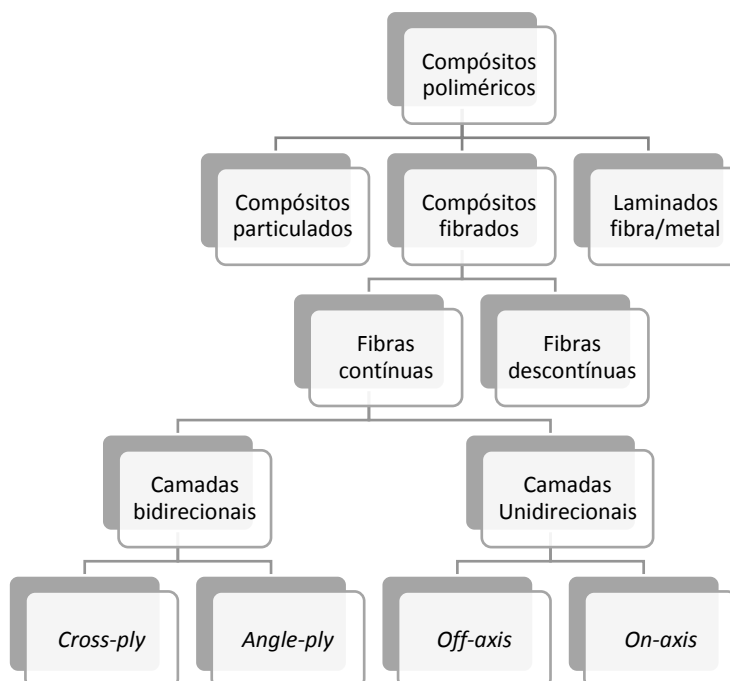
Os quatro tipos mais comuns de resinas de poliésteres insaturadas são: a ortoftálica, isoftálica, tereftálica e a bisfenólica. A resina ortoftálica é requerida quando ambiente não necessita de alta inercia química. A resina isoftálica apresenta bom desempenho com ambientes moderadamente agressivos. A tereftálica e a bisfenólica possuem uma elevada resistência química.

#### 4.3.2 Reforço fibrosos

A fase de reforço proporciona força e rigidez ao compósito. O reforço pode ser do tipo fibroso ou particulado, podendo ser do tipo natural ou sintético. (CAMPBELL, 2010; JOSE ET AL, 2012).

Na Figura 7, tem-se um esquema que apresenta a classificação dos compósitos poliméricos quanto as suas matrizes e seus reforços com fibras.

Figura 7 - Classificação dos compósitos poliméricos quanto ao reforço



Fonte: Adaptação Marinnuci (2011).

Os termos *off-axis* e *on-axis* designam que a orientação das fibras é a mesma em todo laminado e estão na mesma direção do carregamento para as camadas unidirecionais *on-axis*, e deslocada em determinado ângulo para as camadas unidirecionais *off-axis*. Para as camadas bidirecionais, os termos *cross-ply* e *angle-ply* indicam que as camadas estão organizadas positivamente e negativamente em relação a direção de referência, ou seja 0° e 90° para *cross-ply*; e, distintas em 0° ou 90° para as camadas *angle-ply*. (MARINUCCI, 2011)

Os diferentes reforços podem ser encontrados em várias configurações, estas são escolhidas dependendo da configuração da peça final, que está associado também aos métodos de produção do compósito.

As fibras produzem compósitos com alta resistência devido ao seu pequeno diâmetro, tendo essas maiores flexibilidades e sendo mais acessíveis aos processos de fabricação, como a tecelagem ou a formação sobre fios. As fibras tipicamente utilizadas como elemento de reforço são as de vidro, aramida e de carbono, podendo ser contínuas ou descontínuas, curtas ( $L < 15$  cm) ou longas ( $L > 15$  cm). (CAMPBELL, 2010; MARINUCCI, 2011).



#### 4.3.2.1 Fibra de Vidro

As fibras de vidro proporcionam a melhor relação custo/benefício entre os reforços oferecidos para a fabricação de materiais compósitos poliméricos. Isso devido a origem e abundância dos materiais utilizados na fabricação, (silício contido nas areias, calcário, ácido bórico, carvão e argilas). (MARINUCCI, 2011).

As fibras de vidro são classificadas conforme sua composição. Cada composição possui uma aplicabilidade distinta. A fibra de vidro E tornou-se mais usual na fabricação de compósitos poliméricos por ter elevada resistência mecânica e boas propriedades químicas. (FELIPE, 2008; MARINUCCI, 2011). O Quadro 1 apresenta o tipo, a composição e as respectivas propriedades dos variados tipos de fibra.

Quadro 1 - Composição e propriedades das fibras de vidro.

<b>Classe</b>	<b>Composição</b>	<b>Propriedades</b>
Vidro A	Alto teor de álcalis	Apresenta uma boa resistência química, baixas propriedades elétricas e possui baixo módulo de elasticidade.
Vidro C	Borosilicato de sódio	Excelentes propriedades químicas e é normalmente utilizado em revestimento superficial de estruturas metálica.
Vidro D	-	Altas propriedades dielétricas e são utilizadas com vistas a um alto-desempenho em aplicações eletrônicas.
Vidro E	Alumina-borosilicato e baixo teor de álcalis	Excelentes propriedades elétricas, apresenta também, boas propriedades de resistência, rigidez e desgaste.
Vidro L	Alto teor de chumbo	É usado como protetor de radiação em instalações de Raios -X e possui também alta resistência mecânica.
Vidro M	-	Possui alto módulo de elasticidade (113 GPa), porém por conter berílio em sua constituição é impedido a sua comercialização.
Vidro S	Silicato de alumínio	Boa resistência a tração e um módulo de elasticidade muito superior aos outros tipos, além de possuir um bom comportamento a fadiga, temperatura e umidade.

Fonte: Adaptado de Felipe (2008).

A adesão das fibras de vidro na matriz polimérica é devida a promotores de ligação do tipo organossilanos. Estes componentes orgânicos formam uma ligação estável entre materiais orgânicos e inorgânicos, pois sua estrutura possui grupos de afinidade orgânica e inorgânica. (LEVY NETO, PARDINI, 2006).

As fibras de vidro estão disponíveis no mercado nas formas de mantas, *roving* e tecidos. Nos processos de laminação manual, pultrusão, centrifugação e outros são utilizadas as fibras na forma de manta e tecidos, acondicionadas geralmente em bobinas. (OLIVEIRA, 2013)

As mantas contêm fibras picadas, Figura 8, com cerca de 5 cm de comprimento, com arranjo aleatório. Elas são agregadas em forma de placas por ligantes especiais apresentando relativa uniformidade em relação a resistência mecânica e possuem a vantagem de ter excelente molhabilidade, fácil aplicação, boa moldabilidade e produzem laminados bastantes homogêneos. Suas gramaturas disponíveis no mercado são  $300 \text{ g.m}^{-2}$ ,  $450 \text{ g.m}^{-2}$  e  $600 \text{ g.m}^{-2}$  (MARINUCCI, 2011).

Figura 8 – Manta de fibra de vidro



Fonte: Autoria própria (2016).

#### 4.4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Dentre os processos mais utilizados para a confecção dos compósitos podem ser destacados a laminação manual (*hand Lay-up*), moldagem em *bags*, pultrusão, filamento *winding*, moldagem com pré-forma, moldagem por transferência de resina - R.T.M. (*Resin Transfer Molding*), moldagem por injeção de resina - R.I.M. (*Resin Injection Molding*). (JOSE et al, 2012).

O processo de laminação manual (*Hand Lay-up*), conforme Cavalcante (2006, p.34), consiste em aplicar camadas alternadas de fibras, na forma de tecido ou manta,

e resina ao molde. A resina é aplicada sobre as fibras com auxílio de um rolo ou pincel, que também possui a finalidade de eliminar as bolhas existentes, conforme Figura 9.

Felipe (2008) indica que o processo mais utilizado em produções de pequenas séries e peças de grande superfície é a laminação manual. É também o método mais econômico por apresentar a necessidade de baixo investimento e não requer uma mão de obra especializada.

Figura 9 - Laminação manual (*Hand Lay-up*)



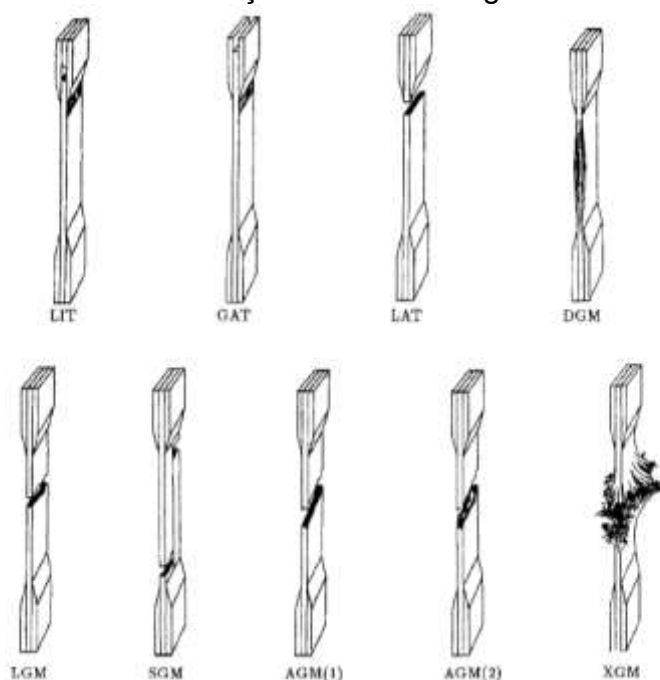
Fonte: Autoria própria (2016).

#### 4.5 MECANISMO DE DANO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os danos em compósitos podem ser causados de diversas formas, tais como, descontinuidades das fibras, porosidade, delaminações, áreas pobres ou ricas em resina ou em operações que envolvam abrasão, erosão, exposição a agentes ambientais, como temperatura, umidade e/ou radiação ultravioleta. Os danos nem sempre são visíveis, mas, podem reduzir a resistência do material. (REZENDE, 2007).

A análise macroscópica do dano revela a formação e a propagação da fratura mecânica do mesmo. Já na análise microscópica verifica detalhadamente o dano microestrutural. Os mecanismos de danos nos compósitos ocorrem de forma progressiva, com falhas ao longo do material. A norma ASTM D3039-14 classifica as fraturas de acordo com códigos descritos no Quadro 2 e ilustrada na Figura 10.

Figura 10 - Classificação da fratura segundo ASTM D3039-14.



Fonte: ASTM D3039 (2014).

Quadro 2 - Características dos modos de falhas.

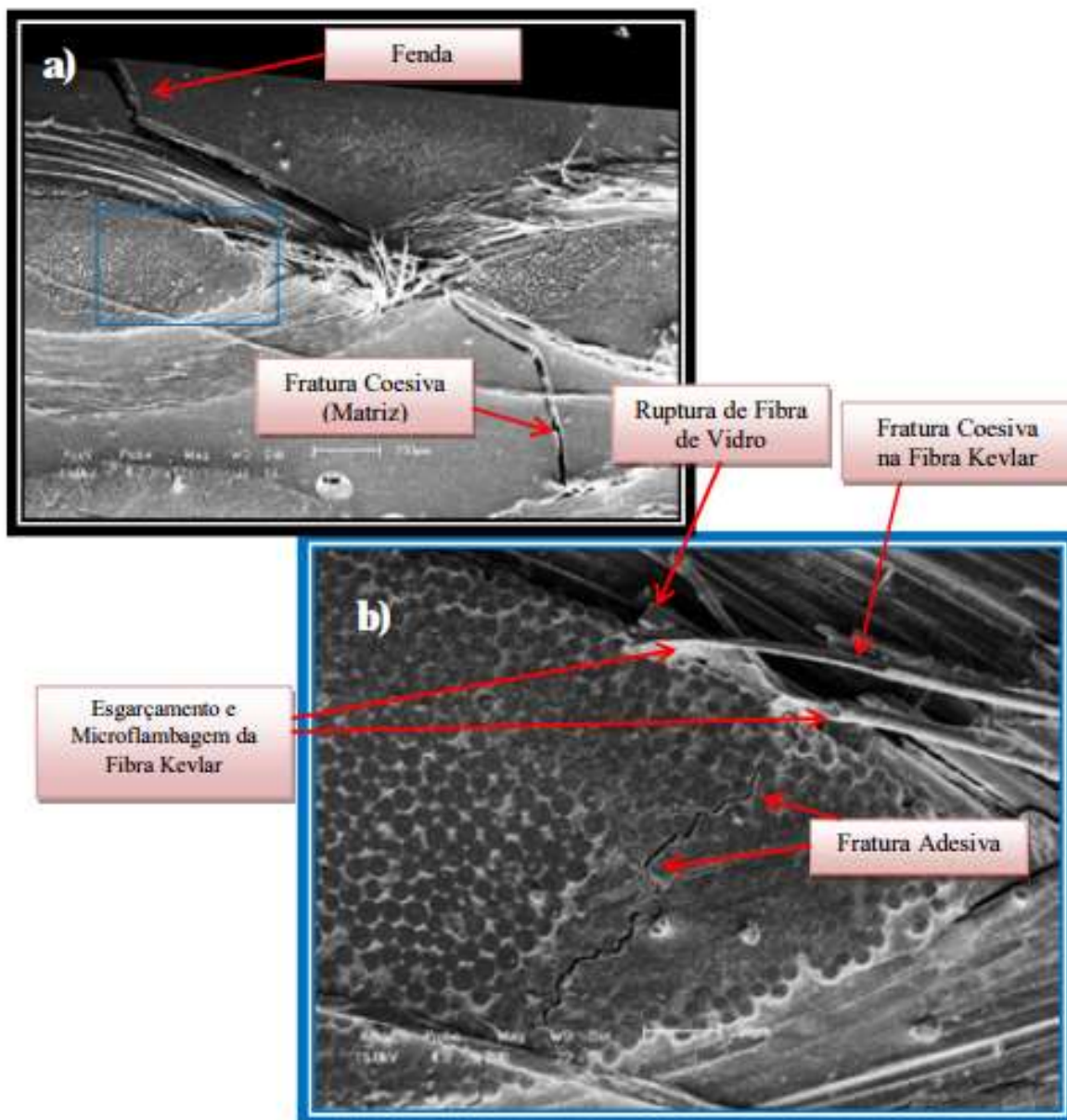
<b>Código</b>	<b>Característica</b>
LIT	Lateral dentro da garra ( <i>Lateral – inside – top</i> )
GAT	Desaderência da lingueta na garra ( <i>Grip/tab – at grip/tab – top</i> )
LAT	Lateral na base da lingueta da garra ( <i>Lateral – at grip – top</i> )
DGM	Delaminação na lateral do corpo de prova e no meio do galgo ( <i>Edge delamination – gage – middle</i> )
LGM	Lateral e no meio do galgo ( <i>Lateral – gage – middle</i> )
SGM	No meio do galgo com fendas longitudinais ( <i>Longitudinal splitting – gage – middle</i> )
AGM	Angular e no meio do galgo ( <i>Angled – gage – middle</i> )
XGM	Explosiva e no meio do galgo ( <i>Explosive – gage – middle</i> )

Fonte: Adaptado de ASTM D3039, (2014).

De acordo com Felipe (2012b), a análise macroscópica do dano pode ser feita a partir da observação das fraturas, após os ensaios mecânicos. Os danos de falhas

mais comuns em compósitos poliméricos com reforços fibrosos são: delaminação, microfissuras na matriz e rupturas de fibras, como mostra a Figura 11.

Figura 11- Principais danos em compósitos laminados



Fonte: Felipe (2012b).

Na análise macroscópica destaca-se pelo menos duas formas de dano, segundo Felipe (2012a), quando ele se dá por tempo de utilização, principalmente em ambientes agressivos (desgaste no material), ou quando o mesmo é originado pela ação de carregamentos externos, ou seja, fratura mecânica do elemento estrutural.

#### 4.6 ENVELHECIMENTO NOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos poliméricos possuem alta resistência específica, alta rigidez específica, e alta resistência a agentes químicos, por isso seu uso, em áreas de aplicação que sofrem com corrosão e deterioração das estruturas com o passar do tempo, é estimulado. (DOGAN; ATAS, 2015).

A aplicação dos compósitos vem sendo estudada nas diversas áreas do conhecimento, com o objetivo de determinar o comportamento mecânico destes compósitos, determinando diversas propriedades, como módulo de elasticidade, resistência à compressão, ao impacto, à flexão e à fadiga e sua possível aplicação na construção civil.

Dependendo da aplicação do compósito, o estudo de degradação ambiental é de grande relevância, uma vez que a degradação é resultado da ação da variação de temperatura, radiação solar, poluição, cargas de fadiga e condições que levam ao envelhecimento do material, resultando assim, na diminuição das propriedades mecânicas do mesmo.

A degradação de compósitos é qualquer degradação de ordem química, física, ou por agentes mecânicos. Parâmetros como radiação ultravioleta (UV), temperatura, agentes oxidantes e poluentes atmosféricos comprometem de forma severa os compósitos poliméricos. (RODRIGUES, SILVA, AQUINO, 2012; WOO et al, 2008).

Segundo Bergeret, Ferry e Lenny (2009) a utilização de compósitos poliméricos em ambientes agressivos tem dado origem a vários estudos referentes a avaliação do comportamento mecânico destes, quando expostos a condições adversas, tais como, temperaturas elevadas e/ou baixas, umidade/água, exposição aos raios ultravioletas (UV), atmosfera salina, presença de micro-organismos e também a tensões mecânicas devido a tensões geradas ao longo do tempo.

Se o compósito polimérico for reforçado com fibras naturais, agentes biológicos, soluções alcalinas e ácidas, absorção de umidade, associada aos outros parâmetros

já citados, se comportam também como agentes que podem ocasionar envelhecimento no material. (RODRIGUES, SILVA, AQUINO, 2012).

A degradação dos compósitos com matriz polimérica pode ocorrer principalmente por três mecanismos, segundo Pereira et al (2014), que são: a) a fotodegradação, que é a degradação química induzida pela presença da luz, ocasionando a deterioração progressiva das propriedades mecânicas, da massa molar e o aumento da cristalinidade; b) a termomecânica, que corresponde ao mecanismo de cisão de cadeia polimérica através da tensão provocada pela temperatura; e c) físicos, no qual há perda das propriedades mecânicas e formação de fissuras.

O envelhecimento no compósito polimérico quando em contato com solventes pode acontecer mediante a difusão das moléculas de água nos poros, pelo processo de capilaridade da umidade na região de falha da interface fibra/matriz e ainda por microfissuras existentes na matriz. (MOUALLIF, 2014).

Alguns estudos vêm sendo realizados sobre esse tema utilizando compósitos poliméricos com os diferentes tipos de reforços e matrizes. Essas pesquisas submetem os compósitos poliméricos a envelhecimento térmico com ciclos de temperaturas diferentes, a absorção de umidade, a radiações ultravioletas e oxidações diversas, com o intuito de avaliarem as características mecânicas destes materiais quando submetidos a esses agentes de envelhecimento ambiental.

Sabe-se também que os agentes de envelhecimento ambiental não agem de maneira isolada, ou seja, há uma interação destes, podendo causar danos distintos nos compósitos quando expostos a ambientes que possuem mais de um precursor de degradação ambiental.

Desse modo, a seguir serão apresentadas partes de alguns trabalhos, em que os autores analisaram o comportamento mecânico de compósitos poliméricos quando expostos a esses agentes. Estas análises aconteceram a partir do contato do compósito com o agente causador do envelhecimento ambiental.

#### **4.6.1 Temperatura**

O início da degradação térmica envolve a perda de um átomo de hidrogênio da cadeia do polímero, como resultado da entrada da energia como forma de calor ou luz. O polímero instável, contendo um radical livre e um átomo de hidrogênio altamente



reativo, com um elétron desemparelhado, reage com a molécula de oxigênio para formar um radical peróxi ( $\text{ROO}^*$ ) que pode, em seguida, remover um átomo de hidrogênio de outra cadeia de polímero para formar um hidroperóxido ( $\text{ROOH}$ ) e assim regenerar o radical livre, dando sequência assim, ao mecanismo de dano no compósito. (DOGAN, ATAS, 2015).

O mecanismo de dano no compósito polimérico devido a alterações térmicas pode ocasionar alterações das propriedades mecânicas tais como variações na resistência à fadiga, resistência à tração, na tensão de cisalhamento dentre outras.

Segundo Fan et al (2016) o envelhecimento termo-oxidativo (TOA) de polímero envolve o envelhecimento físico e químico. No primeiro há o relaxamento estrutural do estado vítreo para o equilíbrio metaestável do estado amorfo, sendo acompanhado pelo aumento da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e pelo módulo na matriz. No envelhecimento químico inclui principalmente as mudanças químicas na estrutura do polímero devido a elevada temperatura e pela presença de oxigênio. Ainda no mesmo trabalho, foi analisado o envelhecimento termo-oxidativo de compósitos poliméricos com matriz epóxi e reforço de fibra de carbono, durante um período de 1200 horas a  $120^\circ\text{C}$ . Foi observado o processo de deterioração progressiva da matriz e na interface fibra/matriz, sob a forma de cisão da cadeia, perda de massa, fissuras e oxidação dos elementos que continham carbono.

A transição vítrea é a transição que um material amorfo ou semicristalino sofre ao sair de sua condição viscosa (elástica) para uma condição vítrea (rígida) ou vice-versa. Nessa transição ocorrem alterações em algumas características, como coeficiente de expansão térmica e calor específico. A temperatura de transição vítrea,  $T_g$ , é a temperatura (ou faixa de temperatura) média em que ocorre essa transição. (LORANDI, CIOFFI, ORNAGHI JR, 2016).

A perda de massa ocasionada pelo agente de envelhecimento devido a temperatura no compósito de matriz polimérica ocasiona instabilidade estrutural no material, uma vez que provoca variações dimensionais, deterioração superficial (como exposição do reforço, formação de sulcos e ranhuras na matriz) e interna como o surgimento de micro e macro fraturas na matriz. (LEÃO, TINO, AQUINO, 2015).

Para a avaliação da influência da variação da temperatura no compósito epóxi/carbono, Peterson et al (2008), visualizaram que a termoclivagem pode induzir danos no compósito por causa das tensões residuais causadas pela diferença entre

os coeficientes de expansão térmico dos componentes do material. Eles submeteram o compósito a exposição a temperaturas a baixas e apresentaram, através de um modelo de dano micromecânico, a previsão de fraturas no material. Os ciclos de temperaturas utilizados no estudo foram: 121 °C até 25 °C e de 121 °C até -50 °C. Foi aplicado um modelo em elementos finitos, para determinação das tensões internas provocadas pelos diferentes coeficientes de expansão, e um outro modelo de cisalhamento, para mostrar o espaçamento das fissuras da matriz. Como resultado foi detectado que em temperaturas mais baixas (- 50 °C) a tensão resultante do esforço de tração longitudinal na matriz excede a resistência da matriz epóxi para a maioria dos percentuais de volume de fibras, resultando em fissuras na matriz. Para 25 °C os modelos mostraram que as tensões internas não são suficientes para a provocar fissuras na matriz.

Quanto a previsão do modelo para cisalhamento, foi observado que há uma dependência da temperatura de serviço com o espaçamento das fendas do compósito. Desta maneira, as previsões apresentadas pelos modelos estão em conformidade com os dados experimentais e assim, o desenvolvimento de danos em compósitos deve ser considerado quando estes forem utilizados em temperaturas baixas.

As características higroscópicas da resina e/ou da fibra possibilitam uma maior ou menor absorção de calor para alguns compósitos, podendo dilatar o volume do material. Este fato pode levar a deficiências na resistência (mecânica, térmica e de degradação) da estrutura quando o compósito for utilizado.

Através da avaliação de três configurações de reforços de fibra de carbono com matriz vinílica (Tecidos lisos T300 / vinilester CFRP, tecido plano T700 / vinylester CFRP e o multi-axial), Noda, Nakada e Miayano (2007) estudaram a influência da variação da temperatura (de 25 °C até 100°C) no compósito laminado aplicado na indústria náutica. Observou-se uma acentuada redução da resistência mecânica à flexão e da resistência à fadiga com o aumento da temperatura ao longo do tempo, reduzindo assim a vida útil destes materiais.

Noda, Nakada e Miayano (2008) realizaram outra investigação sobre o desempenho mecânico com um compósito unidirecional com fibras de carbono (com 63% de fração volumétrica de reforço), e resina epóxi nas temperaturas de 25 °C e 120 °C, em que foi determinado o limite de resistência à tração e deformação até a

falha, além da inspeção de rupturas do material. Foi observado que ao analisar o material a 90 % de deformação, com o incremento da temperatura, ocorria a diminuição do número de falhas nas fibras. Dessa forma é possível concluir que o acúmulo de fibras rompidas está relacionado com a temperatura e com as características viscoelásticas da matriz. Em temperaturas menores (25 °C), houve a concentração de danos próximos a região da ruptura das fibras, provocando assim, um aumento da resistência e diminuição da deformação.

Dao et al (2006) compara as diferentes alterações químicas e físico-químicas observadas para o compósito com matriz epóxi com fibra de carbono 8552/IM7, quando submetido somente ao envelhecimento térmico em quatro diferentes temperaturas (70, 120, 170, e 200 °C) por até 7.500 horas. Neste estudo a temperatura de 70 °C, ocasionou degradação nos vários grupos que compõem o compósito derivados do seu monômero, onde há muitos grupos metilenos que são susceptíveis à oxidação térmica.

Os resultados experimentais obtidos na pesquisa de Dao et al (2006) indicaram que os mecanismos químicos de envelhecimento podem ser complexos e que eles variaram com a temperatura de envelhecimento na faixa de 70 °C a 200 °C, que é um intervalo de temperatura muitas vezes utilizado nos estudos de envelhecimento acelerado.

Em baixas temperaturas ( $\cong 70$  °C) o mecanismo de dano seria dominado por degradação de falhas simples, com pouca influência sobre as propriedades físicas do compósito. Em temperaturas intermediárias ( $\cong 120$  °C), grupos funcionais específicos na molécula são oxidados, e a temperaturas mais elevadas ( $\cong 170$  °C) a oxidação se torna mais diversificada com reações de grupos alifáticos em diferentes locais do compósito, e com a formação de amida e grupos ácidos. Em altas temperaturas ( $\cong 200$  °C), a degradação é intensa na superfície. A matriz mais interna do compósito é protegida por ter mais camadas de carbono, sendo menos degradada que na superfície. Mesmo com temperaturas bastante altas, o processo de degradação demanda tempo para afetar a composição química interna do compósito. (DAO et al, 2006)

Os compósitos poliméricos podem se degradar quando expostos a temperaturas baixas, moderadas e/ou elevadas. No entanto, a generalização é dificultada, uma vez que o tipo de polímero, bem como, o processo de fabricação do

compósito também deve ser levado em consideração como fatores a serem equacionados.

No estudo de Jones, Ng e McClelland (2008) foi utilizado o compósito epóxi/fibra de carbono que foi envelhecido à temperatura ambiente sob baixa umidade por até 60 dias. Foram realizados ensaios de fotoacústica por espectroscopia de infravermelho, e os espectros mostraram pequenas mudanças nas tensões de cisalhamento, após os dias de exposição.

Ammar-Khodja et al (2008) estudaram a influência da temperatura em um compósito laminado de carbono/epóxi com oito camadas de tecidos pré-impregnados com fibra de carbono por um período de exposição de 9.000 horas por 140, 160 e 180 °C. O desgaste do material foi acentuado ao longo do tempo de exposição e com o aumento da temperatura. O envelhecimento termo-oxidativo foi notado através da formação de uma camada oxidada na superfície do compósito, como também foi observada uma perda de peso e da resistência residual à compressão a medida que a temperatura aumentava e o tempo de exposição se estendia.

Como resultado da degradação térmica, o dano pode ocorrer mediante a combinação da degradação da superfície e o surgimento de microfendas perpendiculares a superfície, seguida da cisão da cadeia, da difusão de oxigênio na matriz e da difusão de produtos de degradação fora da matriz. (DOGAN, ATAS, 2015).

#### **4.6.2 Oxidação**

Os mecanismos de foto-oxidação são muito conhecidos. A oxidação da superfície de um compósito pode indicar o grau de degradação e, assim, as perdas das propriedades mecânicas do material. Os efeitos nas superfícies de compósitos devido à degradação oxidativa geram variações das propriedades mecânicas, que muitas vezes podem ser verificadas através dos testes de envelhecimento acelerado.

A oxidação em compósitos poliméricos é inicialmente limitada a uma camada superficial, até o aparecimento de fissuras na camada externa do mesmo. Essas microfissuras tornam-se novas rotas para o oxigênio penetrar no interior do material e assim conduzir a oxidação mais internamente. Como consequência disso, o material sofre danos, como perda de massa, e até na eficiência das propriedades mecânicas devido as modificações sofridas na interface fibra-matriz. (LIANG, POCHIRAJU, 2015)

Tanaka (2002) estudou isoladamente as matrizes dos compósitos, com o objetivo de investigar as características e mecanismos de degradação das mesmas. As matrizes estudadas foram polietileno (PE), polietileno tereftalato (PET), sulfeto de polifenileno (PPS) e epóxi. Dessa forma, foi possível observar neste estudo que o processo de degradação num polímero segue os seguintes passos: a geração de radicais livres (por tensão elétrica), cisão de cadeias do polímero, formação de regiões degradadas e progresso da auto-oxidação.

Laminados expostos em um ambiente oxidante por um determinado período, levam à distintas variações nas estruturas. Conforme mostra Liang e Pochiraju (2015) uma zona oxidada, desenvolve e se amplia para o interior do material a partir da superfície exposta. O crescimento da oxidação depende da ortotropia do material; e é esperado que seja mais rápido ao longo da fibra devido à maior difusão do oxigênio nessa direção.

Em um compósito formado por camadas (lâminas), a direção da difusividade de oxigênio acontece ao longo da interface fibra/matriz. Por conseguinte, regiões maiores de degradação são evidentes nas bordas das lâminas por estarem mais expostas ao oxigênio. Logo, as bordas com furos e ranhuras por exemplo, deverão ser confeccionados ou protegidos com revestimentos para impedir o mecanismo de aceleração da degradação. (LIANG, POCHIRAJU, 2015).

Segundo Agnelli e Chinelatto (1992), entre os processos foto-oxidativos e termo-oxidativos, o primeiro acelera mais o envelhecimento ambiental em compósitos poliméricos, uma vez que os hidroperóxidos, responsáveis por esta característica, são resultados das etapas de síntese, armazenamento e processamento, e de um menor número de ciclos dos radicais formados até o fim do processo, visto que, no estado sólido a mobilidade destes radicais é muito menor e portanto a probabilidade de se recombinarem é maior.

A degradação oxidativa na matriz polimérica dos compósitos geralmente se assemelha a do polímero puro. No entanto, de acordo com Fiamegkou (2014) as fibras e a interface fibra-matriz alteram significativamente as propriedades de transporte de oxigênio, anisotropia e também influenciam na extensão do dano no interior do compósito.

De acordo com Britzki e Fachine (2011, p.8) a fotodegradação de polímeros são processos físicos e químicos, em que se tem a absorção da radiação ultravioleta pelo polímero ou por grupo que absorve a luz nesta determinada região do espectro

(cromóforos), ocasionando algum tipo de perda nas propriedades do material. No processo fotodegradativo podem ser observadas reações de oxidação, por variações de temperaturas ou da umidade, nos quais podem acontecer a ruptura das ligações covalentes, ocorrendo concomitantemente a redução da integridade mecânica, fissuramento, perda do brilho, fragilização, descoloração, etc.

#### **4.6.3 Radiação ultravioleta (UV)**

A luz ultravioleta da radiação do sol é forte o suficiente para quebrar as ligações covalentes em polímeros orgânicos, causando amarelecimento e fragilização. Todos os polímeros são sensíveis a este tipo de radiação. (HOLLAWAY, 2010).

De acordo com Britzki e Fachine (2011) a fotodegradação de polímeros são processos físicos e químicos, em que se tem a absorção da radiação ultravioleta pelo polímero ou por grupo que absorve a luz nesta determinada região do espectro (cromóforos), ocasionando algum tipo de perda nas propriedades do material. No processo fotodegradativo podem ser observadas reações de oxidação, por variações de temperaturas ou da umidade, nos quais podem acontecer a ruptura das ligações covalentes, ocorrendo concomitantemente a redução da integridade mecânica, fissuramento, perda do brilho, fragilização, descoloração, etc.

O compósito com tecido de fibra de vidro de reforço e a matriz de poliéster, foi irradiado por uma lâmpada ultravioleta SJD-1 no período de 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 dias, foi o objeto de estudo de Hongwang e Huang (2010). Foi observado que as propriedades mecânicas, resistência à flexão e a tensão, diminuíram gradualmente sob efeito de radiação ultravioleta prolongada. O processo de corrosão do polímero quando em contato com o oxigênio seria acelerado pela ação dos raios UV, resultando desse modo num percentual maior de danos no compósito.

Nos estudos desenvolvidos por Nicholas et al (2016), a mudança de cor e degradação da estrutura química do compósito termofixo de poliuretano reforçado com fibra de vidro tipo-E foi observada com o aumento do tempo de envelhecimento. Os resultados mostraram que acima de 500 horas de exposição a radiação UV houve variação de cor de até 70%. Com a foto-oxidação também houve a retração da superfície do polímero de 30 mm à 1.000 h de exposição ao ambiente de envelhecimento acelerado; e com isso ocorreu a aumento da rugosidade da superfície do compósito em função dessa retração.

O compósito com tecido de fibra de vidro de reforço e a matriz de poliéster, que foi irradiado por uma lâmpada ultravioleta SJD-1 no período de 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 dias, foi o objeto de estudo de Hongwang e Huang (2010). Foi constatado que as propriedades mecânicas, resistência à flexão e a tensão, diminuíram gradualmente sob efeito de radiação ultravioleta prolongada. O processo de corrosão do polímero quando em contato com o oxigênio seria acelerado pela ação dos raios UV, resultando dessa maneira num percentual maior de danos no compósito.

Além da penetração da radiação UV no compósito, seja de forma natural ou artificial, outros fenômenos que ocorrem são a reflexão e o espalhamento da radiação na área superficial do material. Assim, com a formação dos radicais livres na superfície do compósito e presença do oxigênio inicia-se o processo catalítico e oxidativo, causando danos progressivos no compósito.

Com a avaliação de Fechine et al (2012), que expos a radiação UV por 12 semanas compósitos de poliestireno/montmorilonita (PS/MMT) reforçado com argila, verificou-se que o compostos metálicos existentes na argila aceleram o processo fotodegradativo do poliestireno, contudo, estes não alteraram o mecanismo de degradação, uma vez que os produtos gerados durante a exposição à radiação UV das amostras contendo argila foram os mesmos, os grupos carbonila e hidroperóxidos.

Para as propriedades mecânicas de tração e impacto não houveram significativas alterações, uma vez que ocorreu o impedimento físico da penetração da radiação UV nas amostras, já que as camadas internas do material não foram atingidas pela radiação UV. Dessa forma o poder catalisador dos íons metálicos não foi significativo, já que foi observado, através da avaliação da massa molar, que os compostos metálicos presentes na argila poderiam acelerar as reações fotodegradativas no PS/MMT.

Pillay, Vaidya e Janowski (2009) utilizaram um compósito laminar com matriz de nylon e reforço de tecido de carbono para avaliar a degradação quando este era submetido as variações de umidade e radiação ultravioleta. No entanto, para exemplificar os efeitos do agente de degradação ambiental radiação UV, será apresentado um recorte do trabalho destes autores.

Os corpos de prova foram colocados em uma câmara de exposição, com 12 lâmpadas fluorescentes, que forneciam radiação UV em comprimentos de onda de

200-400 nm. Após 100, 200, 300, 420, e 600 horas os corpos de prova foram retirados para a realização dos ensaios de flexão, impacto e cristalinidade.

Como resultado desta pesquisa foi observado que o compósito exposto a radiação UV apresentou descoloração após 300 horas e, depois de 600 horas os corpos de prova ficaram com a coloração amarelada, porém não havia sinais de calcinação da matriz ou exposição de fibras na superfície do compósito. As amostras mantiveram a sua integridade estrutural, a interface fibra-matriz foi preservada e a cristalinidade aumentou de 40% para 44%, devido à exposição aos raios UV, no entanto, isto foi apenas sobre a superfície das amostras. Não houve alterações significativas nas propriedades de flexão ou impacto do compósito nas condições ensaiadas. (PILLAY, VAIDYA, JANOWSKI, 2009).

O tempo de exposição, o tipo de matriz e reforço, o uso de agentes de cor, catalisadores, dentre outros, são determinantes para a avaliação do dano no compósito quando esse sofre ação da radiação UV. Para um compósito pultruzado vidro/poliéster, foram avaliadas as propriedades de flexão tanto para amostras com fibras longitudinalmente alinhadas quanto em amostras com fibras dispostas transversalmente sob efeito da radiação UV por 576, 1440 e 2160 horas. Os resultados obtidos mostraram que, para os tempos de exposição ensaiados, as propriedades mecânicas (tensão de flexão e módulo de elasticidade) não foram afetadas pela exposição aos raios UV para as fibras dispostas longitudinalmente, mas, a deformação do material, entretanto, aumentou, devido a cisão de cadeias da matriz. Já para as fibras dispostas transversalmente houve uma tendência de queda das propriedades mecânicas analisadas, em função da maior contribuição da matriz polimérica visto a disposição das fibras no compósito. (CHACÓN et al, 2009).

Foi observado também, o desgaste da superfície (degradação) no compósito polimérico com matriz de poliéster ortotereftálica reforçado com fibra natural de licuri, depois que estes foram submetidos a testes de envelhecimento sob ação da radiação ultravioleta e ciclos alternados de vapor aquecido. Na degradação da superfície, além da modificação do aspecto visual do compósito, isto é, variação de cor (processo de foto-oxidação), foi possível verificar pequenas e esporádicas ranhuras na matriz, danos que ocorrem na interface fibra/matriz, sem exposição das fibras, bem como uma leve perda de massa. (LEÃO, TINO, AQUINO, 2015).

Diante disso é possível concluir que a degradação superficial do compósito provocada pela radiação UV favorece a entrada e a difusão de umidade no interior do



material. Neste caso, a combinação dos efeitos higrotérmicos com a degradação causada pela radiação UV, pode afetar significativamente as propriedades do compósito reduzindo sua resistência mecânica, limitando assim o uso do material.

#### **4.6.4 Umidade**

A absorção de umidade em compósitos reforçados com fibras naturais é acentuada, uma vez que o mecanismo de dano no material, por meio deste agente, afeta diretamente a interface fibra-matriz. Nessa interface a mobilidade molecular é diferente, devido as densidades distintas dos constituintes do compósito, o que acaba influenciando na difusão de água e na sua solubilidade no interior do compósito.

As fibras naturais são mais susceptíveis ao envelhecimento ambiental por esse agente, devido ao seu caráter hidrófilo, quando comparada as fibras sintéticas. De acordo Joliff, Belec, Chailan (2013) a difusão da água no compósito varia de acordo com o seu coeficiente de difusão. Parâmetros como temperatura, composição de resina e agente de cura, afetam o coeficiente de difusão, dessa forma são aplicados modelos numéricos para estimar a cinética de difusão da água no respectivo material.

A degradação em compósitos poliméricos pela umidade é devido à difusão de água para dentro do material sendo evidenciada pelo inchaço e possível plastificação da matriz polimérica. A difusividade nesses materiais depende da geometria da amostra, do teor de umidade, da temperatura e do tempo de contato. (DOGAN, ATAS, 2015).

Segundo Dantas, Felipe R. C. e Felipe R. N. (2009) em materiais homogêneos, a cinética de difusão da umidade está relacionada com a capacidade máxima de absorção e com o mecanismo de difusibilidade. Porém, nos compósitos, o processo de difusão da umidade, depende de cada constituinte que faz parte deste material, das frações volumétricas, do arranjo e da morfologia; e ainda, da interfase fibra/matriz.

A hidrólise, de acordo com Aquino et al (2010), é caracterizada como um fenômeno de despolimerização, resultante da reação química entre a água, no estado líquido ou gasoso, com as cadeias do polímero. A formação de produtos gerados pela fotocatalise causam alterações na massa molar do polímero podendo levar esses materiais poliméricos à falha estrutural.

A reação química entre a água e o polímero provoca a cristalização química que altera a cristalinidade e a temperatura de fusão do material com o decorrer do tempo de envelhecimento. (BERGERET et al, 2009).

Essas alterações no polímero geram fenômenos, tais como: fragilidade de algumas ligações químicas interfaciais, hidrofobicidade das funções químicas, a presença de mais ou menos macromoleculares na interface ou de um transporte interfacial.

No trabalho realizado por Silva (2012), as amostras de nanocompósitos com matriz de poliéster biodegradável poli (3-hidroxiobutirato-co-3-hidroxiacrilato (P3(HB-co-8%HV)) e reforço de argila foram imersas em água deionizada a 23 °C e em solução salina (5% NaCl). Foi verificado que as amostras imersas na água deionizada tinham um maior coeficiente de difusão, do que todos os valores obtidos para amostras imersas na solução a 5% de NaCl, mesmo a temperaturas mais elevadas.

Este fato pode ser explicado pela baixa atividade da água em uma solução salina. A atividade da água em compósitos poliméricos laminados está relacionada com aprisionamento químico e físico da água na interface fibra/matriz. A atividade da água modifica a cinética de transporte da mesma e aumenta as pressões osmóticas, provocando assim o aumento das fendas, aumento de vazios e uma maior entrada de água no compósito. (SILVA, 2012).

A presença de umidade no compósito pode iniciar mudanças estruturais dentro da matriz, nas fibras e na interface, podendo provocar uma perda no desempenho mecânico e diminuição da sua eficácia quando em uso. Com isso, esse agente é algo que deve ser considerado, uma vez que compromete o desempenho do material, devido a formação de pequenas fissuras, que podem se desenvolver ao longo do tempo, sendo as mesmas utilizadas como caminhos para a absorção da água. (MAIA, 2013).

#### **4.6.5 Combinação dos agentes de envelhecimento ambiental em compósitos**

Os efeitos ambientais causados pela temperatura e umidade relativa do ar podem ser reversíveis quando o período de exposição é de curta duração. Porém, quando a exposição ocorre em ciclos prolongados, em que a combinação da umidade e mudança de temperatura estão presentes, os efeitos produzidos podem ser irreversíveis, devido à afinidade da água por grupos funcionais específicos de matrizes poliméricas de natureza polar. (CUNHA, COSTA, REZENDE, 2006).

Costa, Botelho e Pardini (2011), estudaram um compósito de fibra de carbono e matriz termoplástica de polissulfeto de fenileno, que foi condicionado sob imersão dos corpos de prova em banhos de água salina com temperatura controlada a 80 °C e sob emissão de radiação UV (por 300, 600 e 900 horas) por 2 meses. Durante a exposição, as amostras foram pesadas semanalmente, com o intuito de verificar a degradação do material em até 900 horas de exposição.

Com relação ao condicionamento por UV, essas amostras apresentaram uma redução na resistência ao cisalhamento interlaminar e losipescu de 2 e 6% a 300 horas, 11 e 10% a 600 horas e 9 e 14% a 900 horas, respectivamente. Esta redução deve-se, possivelmente, pela ação da radiação ultravioleta que promove a quebra por foto-oxidação a cadeia principal do polímero, ocasionando microtrincas na superfície da matriz. (COSTA, BOTELHO, PARDINI, 2011).

Pereira et al (2014) e Pillay, Vaidya e Janowski (2009) observaram que a taxa de absorção da umidade e tempo necessário para que o equilíbrio de saturação seja atingido são influenciados pela temperatura de envelhecimento. Desta forma, a combinação de fatores que promovem o envelhecimento ambiental pode provocar danos mútuos, alterando de maneira concisa a estrutura do compósito.

No trabalho desenvolvido por Cunha, Costa e Rezende em 2006, foram utilizados compósitos poliméricos obtidos a partir de reforços pré-impregnados na forma de fitas unidirecionais de carbono/epóxi (F8552). Foram preparados corpos de prova para os ensaios de resistências à tração longitudinal e transversal, uma parte dos corpos de prova foram acondicionados em uma câmara de climatização, com exposição higrotérmica em água destilada e outro conjunto de amostras foram condicionadas em água salina (NaCl) por exposição em névoa salina, também conhecida como *salt spray*. As temperaturas do experimento foram  $22 \pm 3$  °C e  $82 \pm 1$  °C para as duas condições.

As amostras ensaiadas à temperatura elevada (82 °C), submetidas à câmara de névoa salina apresentaram uma diminuição na resistência à tração longitudinal de 11%. Quanto às amostras ensaiadas para tração transversal à temperatura ambiente (22 °C) foi constatado que as amostras submetidas à câmara de névoa salina apresentaram uma pequena redução na sua resistência.

Para as amostras submetidas à câmara de climatização foi verificado que houve uma redução de 51% da resistência à tração transversal para as amostras

ensaiadas à 82 °C. Já a temperatura ambiente (22 °C), não mostraram perda de sua resistência. (CUNHA, COSTA, REZENDE, 2006).

Assim sendo, o efeito combinado da temperatura elevada de ensaio com o condicionamento em câmara de umidade controlada, reduz as resistências à tração transversal e longitudinal, devido à degradação da matriz polimérica. Mostrando que a resistência à tração de compósitos de fita de carbono unidirecional impregnadas com resina epóxi F8552 com matriz polimérica é severamente afetada em ensaios que utilizam temperaturas elevadas. (CUNHA, COSTA, REZENDE, 2006).

É fato que os ensaios de envelhecimento natural se aproximam das condições de uso real do material, no entanto, para visualização de variações das propriedades mecânicas, como por exemplo resistência a tração, faz necessário um tempo bem maior de exposição quando comparado a ensaios de envelhecimento acelerado.

No trabalho desenvolvido por Pereira et al (2014) foram estudadas as matrizes de Polietileno de alta densidade (PEAD) e Polipropileno (PP). Estes ficaram, por um período de 150 dias, imersos em n-heptano, n-decano, n-tetradecano e tolueno à pressão atmosférica, com temperaturas de (25, 50 e 80)°C em uma estufa.

Como resultados os autores verificaram que o ganho de massa para o PP foi maior do que o PEAD em todas as temperaturas, devido principalmente às diferenças morfológicas e químicas, como o grau de cristalinidade e massa molar existente entre os polímeros.

Com relação aos solventes utilizados, os resultados mostram que a massa molar dos solventes influenciou na velocidade de difusão dos mesmos na matriz polimérica, uma vez que, as moléculas menores possuem maior facilidade de difusão, seguindo o que preconiza os conceitos sobre coeficiente de difusão e de permeabilidade de soluções.

No trabalho desenvolvido por Aquino, Felipe R.C e Felipe R. N. (2012) foi investigado o comportamento mecânico de uma estrutura de compósito polimérico laminar (resina de poliéster) reforçado com fibra de vidro em testes de tração uniaxial, quando expostos a condições de envelhecimento acelerado ambiental. Os experimentos foram realizados em laboratório utilizando uma câmara de envelhecimento, onde o compósito foi exposto a três diferentes testes: umidade/temperatura (por vapor aquecido), exposição à radiação UV, e ciclos alternados de radiação UV e vapor aquecido. Os resultados obtidos a partir da análise

do desgaste desse compósito por microscopia eletrônica de varredura mostraram o comparativo do antes e depois da exposição às variações de umidade e temperatura, ficando claro o desgaste na superfície da resina em pontos isolados para as três condições estudadas. Quanto as propriedades mecânicas do compósito, estas sofrem perdas em todas as condições de envelhecimento, com o impacto mais significativo registrado para a condição exclusiva de radiação UV.

Cinquin e Medda (2008) relacionaram o tipo do acabamento da borda do material com o comportamento mecânico do compósito epóxi reforçado com fibra de vidro, quando envelhecido sob ação da oxidação nas temperaturas de 100 até 150 °C, com um tempo de exposição de até 30.000 horas. Como resultado deste estudo foi verificado a perda de massa do material, atribuído à oxidação, bem visualizada pelo fluxo do material degradado saindo da amostra pelas bordas expostas. A degradação térmica foi mais acentuada no interior do material com bordas usinadas, do que nas superfícies moldadas. Quanto as propriedades mecânicas residuais elas foram mais afetadas no material com menor espessura, demonstrando assim que a degradação do compósito permanece na superfície do material com a oxidação da matriz e surgimento de microfissuras.

No estudo desenvolvido por Zainuddin et al (2011) foi analisada a influência do vapor aquecido e da incidência da radiação ultravioleta em compósitos de fibra de vidro/epóxi. A dinâmica de exposição foi: exposição somente com radiação UV por 4 horas, ciclo combinado de vapor aquecido e radiação UV por 4 horas e somente vapor aquecido por 4 horas. Todas as condições foram analisadas em 5, 10 e 15 dias. Na condição de exposição somente com radiação UV foi observado uma perda gradual de massa com o aumento dos dias de exposição. Para a condição com ciclo combinado houve uma perda de massa acentuada com 12 dias de exposição, e também a perda da resina, verificada através da microscopia eletrônica. Também foi observada foto-oxidação na superfície na condição somente com UV e em ciclo combinado após 15 dias de exposição.

Em geral, a degradação ambiental no compósito pode ocorrer como resultado da ação de agentes físicos, químicos ou biológicos do meio, ou ainda pode ser causada pela combinação destes agentes através de distintos mecanismos químicos, biológicos e/ou mecânicos, conforme observado nos estudos analisados acima.

#### 4.7 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

O tratamento dos esgotos, segundo Rio Grande do Norte (2016), consiste na remoção física, química ou biológica dos poluentes e microrganismos de forma à atender aos padrões de lançamento que visam a saúde e qualidade ambiental e são definidos na Resolução CONAMA nº 430/2011.

Os projetos de concepção das estações de tratamentos de efluentes devem apresentar de maneira clara os seguintes aspectos: o impacto ambiental do lançamento no corpo receptor; os constituintes a serem removíveis com o tratamento; o nível do tratamento e a eficiência de remoção. (SPERLING, 2005, p. 249).

Uma estação de tratamento de efluentes pode ser composta por várias unidades com diferentes processos. A opção por um determinado nível de tratamento em uma ETE, depende da eficiência requerida, tendo em vista a classe de enquadramento e a capacidade de depuração das águas do corpo hídrico receptor. (MINAS GERAIS, 2006).

Baseado nestes aspectos, as estações de tratamento de esgotos (ETE) são idealizadas e a constituição dos seus sistemas são elaborados, em função do tipo de tratamento adotado. Os tipos de tratamento dos esgotos, de acordo com Sperling (2005, p. 249), são usualmente classificados como: preliminar, primário, secundário e terciário, porém, estas estações são projetadas em concreto armado por ser um material de amplo conhecimento na construção civil.

Na construção de estações de tratamento de efluentes utiliza-se o concreto como principal material em projetos de construção. O concreto sofre ação danosa da atmosfera do esgoto, desse modo é necessário a realização de estudos dessas alterações sofridas pelos materiais, devido ao ambiente em que eles estão inseridos.

Segundo Xiaoyan (2005, p. 2) o concreto quando sofre o processo de corrosão ocorre uma perda da sua resistência mecânica, portanto, resulta em danos aos tubos de concreto, poços de visitas e estações de bombeamento. A subsequente reabilitação e substituição desses tubos danificados de esgoto requer alto investimento financeiro.

Além disso, o concreto é suscetível às mais diferentes formas de ataque e, sua deterioração está diretamente ligada à sua porosidade e a espessura de cobrimento, facilitando dessa forma a migração dos agentes agressores as armações do concreto. (SANTOS, 2016).

Assim, fica caracterizado a importância do conhecimento do comportamento e das propriedades dos materiais envolvidos na execução das estruturas de tratamento de efluentes, desde a fase do projeto, a fim de que se possa identificar os agentes causadores de sua deterioração e, com isso, mitigar os danos e assim aumentar a durabilidade da mesma.

O sistema predominante de tratamento de esgoto utilizado pela CAERN em no RN é lagoas de estabilização. Essas em geral realizam tratamento a nível terciária e são consideradas a forma mais simples para o tratamento dos esgotos.

A ETE do Sistema Central de Natal, devido à sua localização e disponibilidade de área foi projetada como um sistema de tratamento convencional com UASB (Reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo) em nível terciário sendo a ETE mais avançada do Estado e com maior capacidade de tratamento. (FERRAZ, 2014).

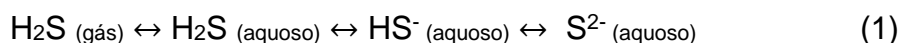
#### 4.8 PARÂMETROS QUE PODEM DETERIORAR O CONCRETO

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) os principais danos que o concreto pode sofrer em ambientes agressivos, como uma ETE, são provocados por sais e íons que causam lixiviação, expansão, reações álcali-agregado, despassivação e agressividade ambiental.

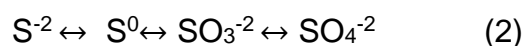
Acidez é um parâmetro que pode ser definido como a capacidade da água de reagir quantitativamente com uma base forte até um valor definido de pH, devido à presença de ácidos fortes, ácidos fracos e sais que apresentam caráter ácido (PIVELI, 2017). A grande importância no controle da acidez das águas reside nos estudos de corrosão, que pode ser provocada tanto pelo gás carbônico (presente em águas naturais), como pelos ácidos minerais (presentes nos efluentes).

A alcalinidade é definida como a capacidade da água de reagir quantitativamente com um ácido forte até um valor definido de pH. No tratamento de efluentes a alcalinidade atua com a função tamponante, ou seja, atua como atenuante na variação do pH, dessa forma, a alcalinidade das águas associa-se à dureza que é responsável pela precipitação de carbonatos principalmente em sistemas de águas com temperatura elevada, provocando a formação de incrustações.

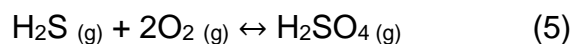
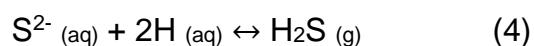
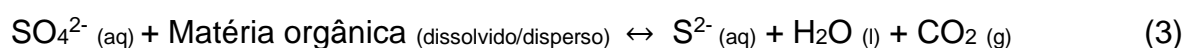
O sulfeto de hidrogênio é um composto, que se dissocia em meio aquoso. A Equação 1 mostra as possíveis reações pelas quais passa o sulfeto de hidrogênio a partir da fase gasosa.



O sulfeto livre pode ainda ser gerado a partir da redução do sulfato presente no efluente, de acordo com a variação do pH do meio, conforme as espécies:



A presença da matéria orgânica em situação de anaerobiose, fazem com que as bactérias redutoras de sulfato o transformem em sulfeto, ocorrendo a liberação do gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). O  $\text{H}_2\text{S}$  predomina-se em meio ácido, em  $\text{pH} > 10$  praticamente todo enxofre se encontra na forma  $\text{S}^{-2}$ , conforme equações 3, 4 e 5. No trecho aeróbio do sistema de tratamento, e em contato com a umidade das paredes internas das estruturas, ocorre a reação de formação de ácido sulfúrico que ataca o concreto. Além do problema da corrosão, o gás sulfídrico traz problemas de odor na rede coletora de esgotos.



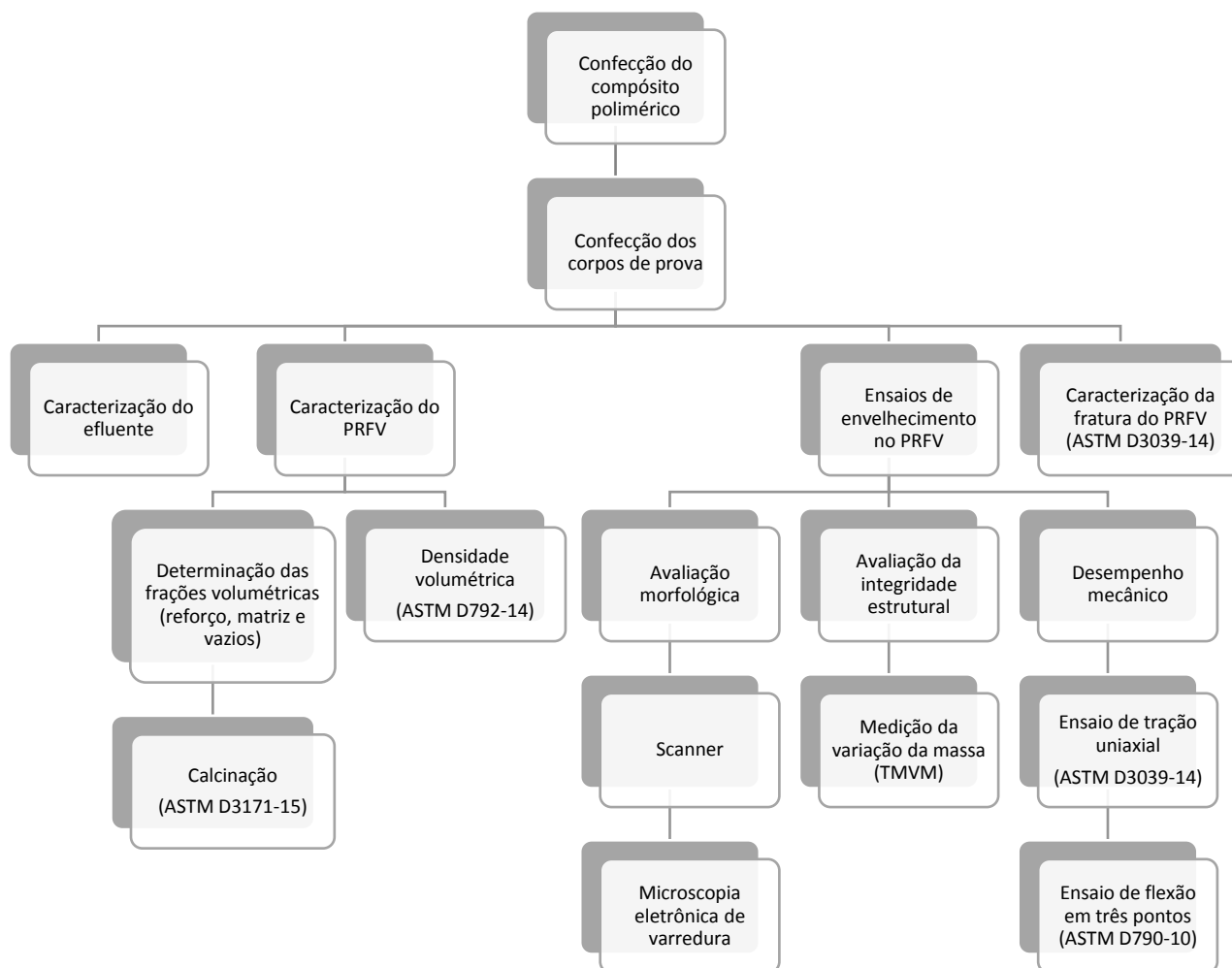
## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será abordada a caracterização da área de estudo, bem como o processo de confecção do compósito, os ensaios realizados para a caracterização do efluente, do compósito, e os ensaios para a avaliação do envelhecimento ambiental



do compósito. A Figura 12 apresenta um fluxograma com os ensaios realizados no efluente e no PRFV estudado.

Figura 12 - Fluxograma dos ensaios realizados no compósito e no efluente



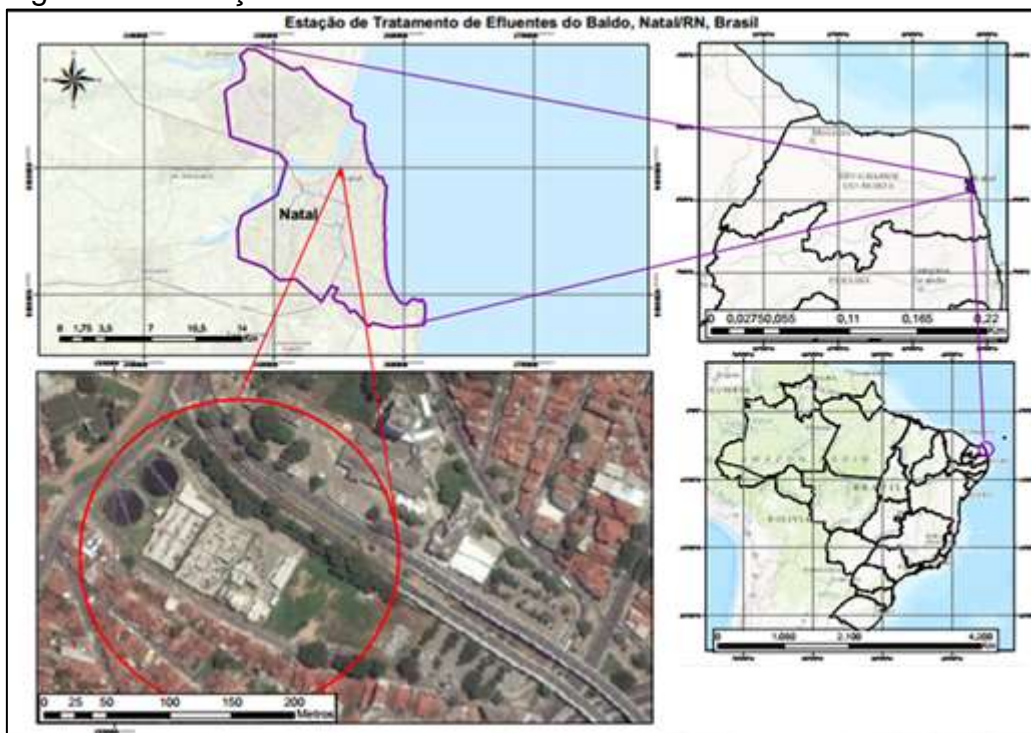
Fonte: Autoria própria (2016).

## 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DO SISTEMA CENTRAL DE NATAL

A Estação de Tratamento de Esgoto do Sistema Central de Natal, também conhecida como Estação de Tratamento do Baldo, está localizada no bairro do Alecrim, Rua Capitão Silveira Barreto, conforme Figura 13. Ela possui a capacidade para tratar uma média de 450 litros por segundo, e está projetada para tratar o esgoto oriundo dos bairros: Alecrim, Areia Preta, Barro Vermelho, parte do bairro Nordeste, Candelária, Cidade Alta, Cidade da Esperança, parte de Dix-Sept Rosado, Lagoa

Nova, Lagoa Seca, Mãe Luiza, Morro Branco, Nazaré, Nova Descoberta, Petrópolis, Praia do Meio, parte das Quintas, Ribeira, Rocas, Santos Reis e Tirol. (RIO GRANDE DO NORTE, 2016).

Figura 13 - Estação de tratamento de efluentes do Sistema Central de Natal/RN.



Fonte: Autoria própria (2016).

O processo de tratamento do efluente, conforme as figuras 14, 15 e 16, *Figura 16 - Processos de tratamentos do efluente na ETE do Sistema Central de Natal*. inicia-se com a remoção de sólidos grosseiros através de um gradeamento por meio de uma sequência de grades (grossas e finas). Em seguida, com sistema de bombeamento (Elevatórias de Esgoto Bruto – EEE), o efluente é encaminhado para a caixa de areia, que devido a sua área, permite a sedimentação dos sólidos inertes/areia.

Ao passar pela caixa de areia o esgoto terá concluído a etapa de pré-tratamento, sendo encaminhado em seguida para os quatro reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manto de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket – UASB*), sendo dois reatores por linha que operam em paralelo, que representam a próxima etapa do tratamento, sendo responsável pela maior remoção da carga orgânica através do tratamento biológico com bactérias anaeróbicas.

Após a digestão de parte da matéria orgânica pelas bactérias no UASB, o esgoto segue para os tanques de aeração, passando antes pelas câmaras anóxicas

com misturadores, onde ocorre a desnitrificação, ou seja, transformação do nitrato em nitrogênio gasoso pelas bactérias.

Após a passagem pelas câmaras anóxicas, a etapa seguinte corresponde a passagem do efluente pelos decantadores secundários, onde ocorre a flotação da espuma e dos sólidos menos densos e a posterior decantação do lodo, garantido assim a clarificação do efluente.

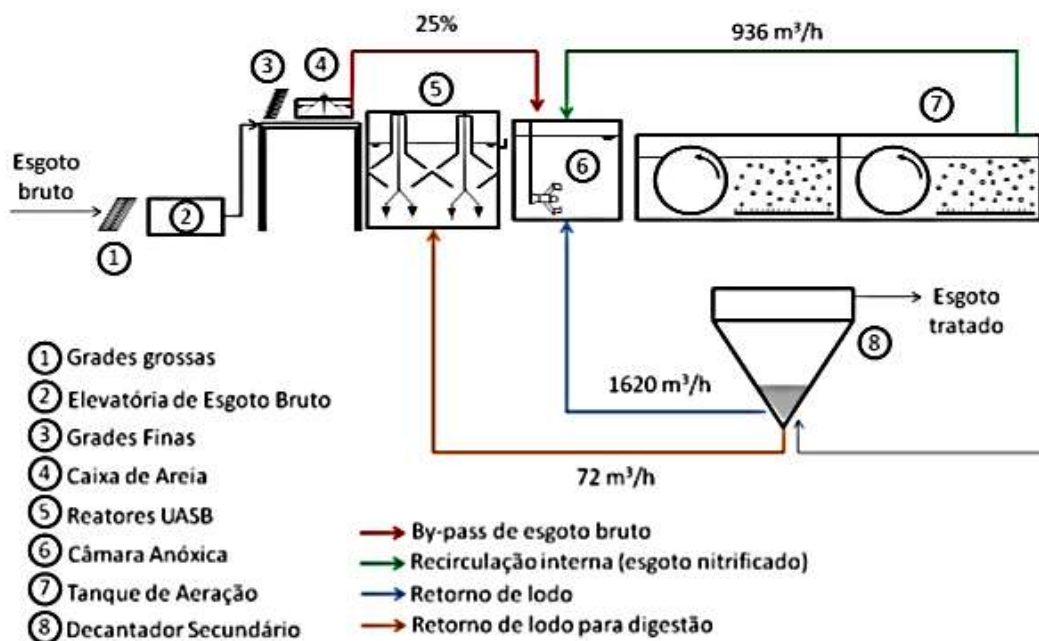
Como tratamento terciário, tem-se a desinfecção do efluente nos reatores com radiação ultravioleta, com o intuito de remover os microrganismos patogênicos através da radiação. O efluente tratado é então lançado no canal do baldo e posteriormente no estuário do rio Potengi. O fluxograma dos processos de tratamentos do efluente na ETE podem ser visualizados nas Figura 14 e 15.

Figura 14 - Vista aérea da ETE do Sistema Central de Natal/RN.



Fonte: FUNCERN (2013).

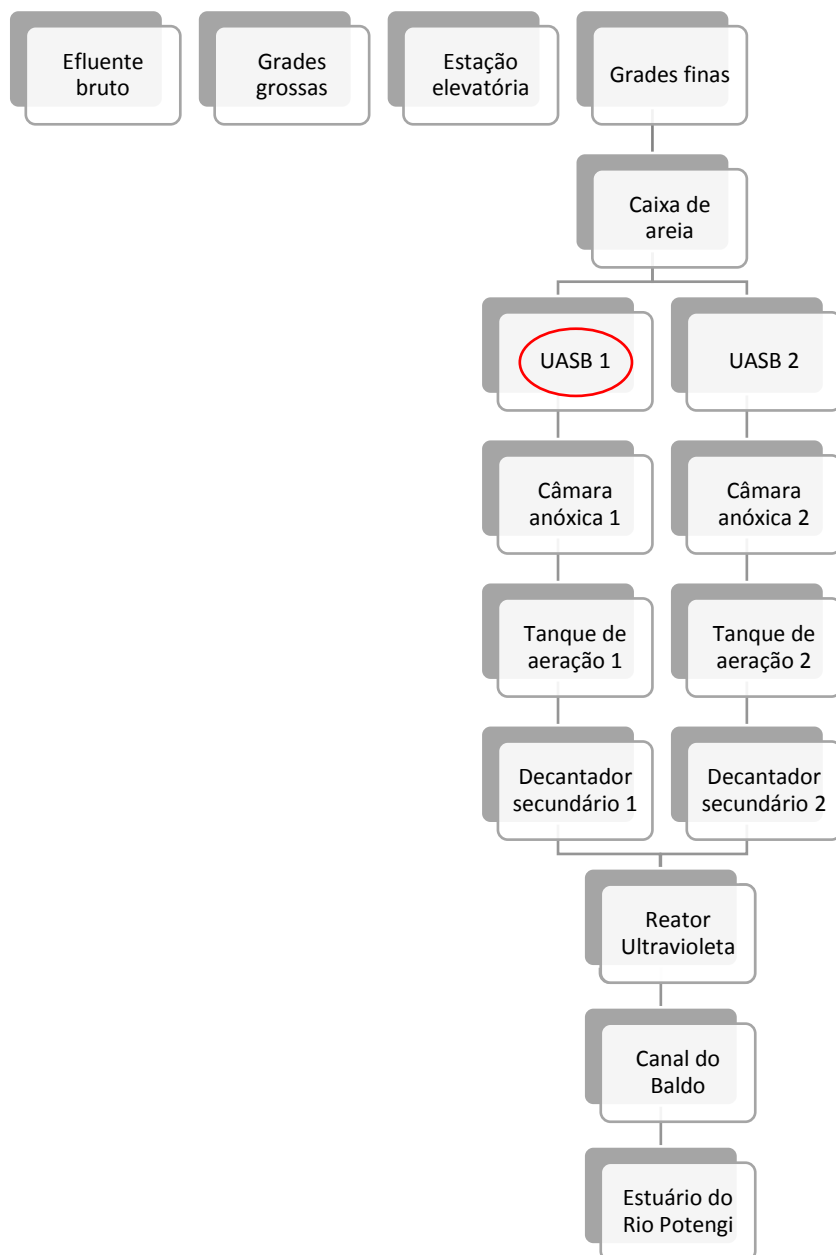
Figura 15 - Esquema representativo de uma das duas linhas de tratamento da ETE do Sistema Central de Natal.



Fonte: Ferraz (2014).

Os corpos de provas confeccionados a partir do compósito laminado polimérico reforçado com fibra de vidro tipo E, foram expostos imersos e acima do efluente por um período de quatro e oito meses no vertedouro após o tratamento nos reatores UASB, conforme sinalizado na Figura 16. Este local foi escolhido por ser de fácil acesso para exposição dos mesmos e por apresentar indicativos de corrosão, incrustação por sais e óxidos de enxofre na estrutura de concreto, conforme

Figura 16 - Processos de tratamentos do efluente na ETE do Sistema Central de Natal.



Fonte: Adaptado de Rio Grande do Norte (2016).

Figura 17 - Vertedouro pós reator UASB, onde foram expostos os CP.



Fonte: Autoria própria (2016).

A ETE estudada possui 8 câmaras (UASB) distribuídas em duas linhas (Linha 1 – UASB 1, 2, 3 e 4 e linha 2 – UASB 5, 6, 7 e 8), podendo remover cerca de 70 % da carga orgânica do efluente. Para garantir um melhor desempenho do processo de tratamento existem caixas de distribuição, responsáveis por garantir que o esgoto penetre nos UASB de forma homogênea. Os UASB são fechados e vedados, pois as bactérias responsáveis pela digestão da matéria orgânica não utilizam oxigênio, como mostra a Figura 18. Existem placas defletoras na parte superior dos reatores responsáveis por promover a separação entre as fases líquidas e gasosas.

Figura 18 - Vista superior dos reatores UASB



Fonte: Ferraz (2014).

## 5.2 CONFECÇÃO DO COMPÓSITO

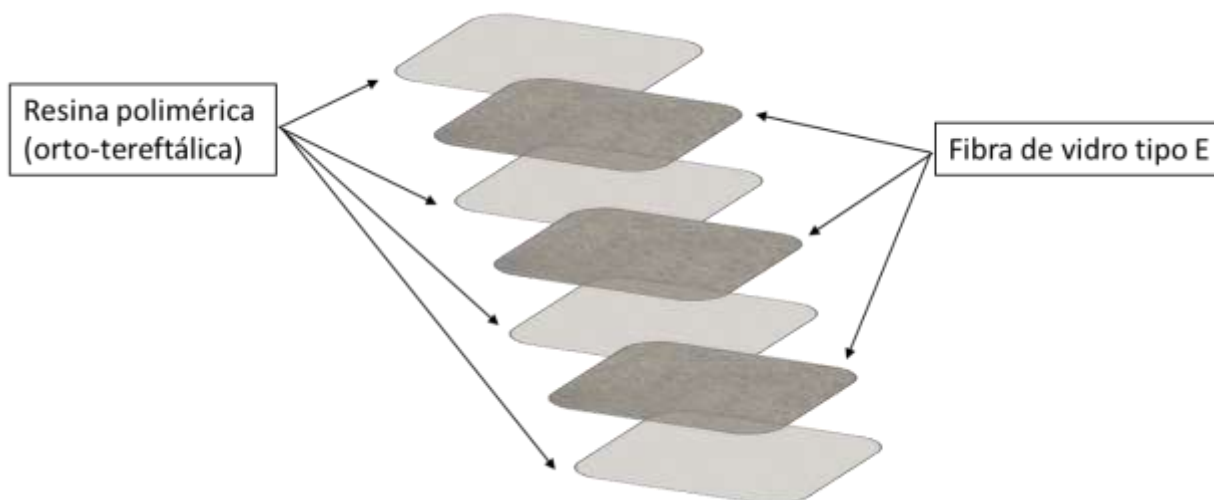
O compósito polimérico com reforço de fibra de vidro tipo E ( $450 \text{ g/cm}^2$ ), e matriz de resina de poliéster orto-tereftálica foi confeccionado no Laboratório de ensaios mecânicos do IFRN, através do processo de laminação manual (*hand lay-up*), Figura 19. Para o processo de polimerização foi utilizado o catalisador MEKP (peróxido de metil-etil-cetona) em uma proporção de 1% do volume da resina, o desmoldante foi a vaselina líquida, e ao final foi confeccionado um laminado contendo três camadas de reforço, Figura 20.

Figura 19 - Processo de fabricação do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro tipo E.



Fonte: Autoria própria (2016).

Figura 20 - Configuração do compósito.



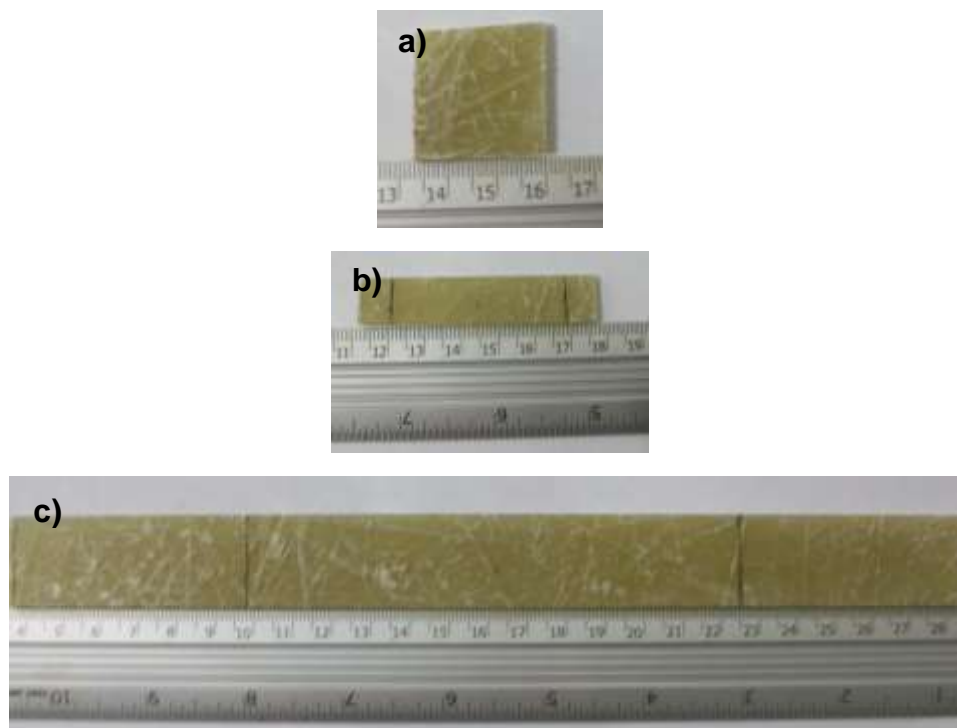
Fonte: Autoria própria (2016).

### 5.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado uma maquina com disco de corte com fio de diamante e refrigerado a ar. Após a confecção, os corpos de prova CP foram lixados com lixa d'água na seguinte sequência granulométrica: 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mm e polidos com alumina de 70  $\mu\text{m}$ , em politriz metalográfica. As dimensões dos CP para o ensaio de densidade, flexão em três pontos e tração foram conforme as normas ASTM D792, ASTM D3039 e ASTM D790, respectivamente. Na Figura 21, é possível observar os respectivos corpos de prova utilizados para os ensaios.



Figura 21 - Corpos de prova a) para o ensaio de densidade, b) para o ensaio de flexão em três pontos e c) para o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autoria própria (2016).

Os corpos de prova foram expostos sob duas condições, 32 CP (16 CP para o ensaio de tração uniaxial e 16 para o ensaio de flexão em três pontos) ficaram imersos no efluente e os outros 32 CP acima, sendo avaliado o comportamento do compósito em dois períodos (4 e 8 meses de exposição) com temperatura média de 29,5 °C. Esta diferenciação na posição de exposição se deu afim de avaliar mudanças no comportamento mecânico dos compósitos poliméricos quando em contato direto ou indiretamente com o efluente. Na Figura 22, tem-se os CP expostos na ETE, ao final de 4 meses foi retirado o primeiro conjunto de 32 CP e os demais só foram retirados quando completos 8 meses de exposição. Este local foi escolhido pois era de fácil acesso para exposição e desmobilização dos corpos de prova e por apresentar severa degradação e incrustações no concreto.

Figura 22 - Exposição dos CP de PRFV.



Fonte: Autoria própria (2016).

#### 5.4 ENSAIOS NO EFLUENTE

Os ensaios realizados nos efluentes serviram para caracterizar o esgoto tratado ao longo do tempo em que os corpos de prova ficaram expostos no efluente pós UASB. As coletas das amostras de efluentes foram realizadas quinzenalmente durante 8 meses, para coincidir com o período em que o compósito permaneceu exposto na estação de tratamento de efluentes.

Para a realização das amostragens foi utilizado o método 1060 da *American Public Health Association*. As amostras coletadas foram acondicionadas em frascos de vidro âmbar, segundo a tabela de acondicionamento e preservação descrito neste método, e encaminhadas para o Laboratório de Química Ambiental do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis e para o Núcleo de análises de água, alimentos e efluentes do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.

A escolha dos ensaios que foram efetuados no efluente, foi baseada de acordo com os principais agentes causadores do envelhecimento ambiental nos compósitos, segundo a literatura. No Quadro 3 estão descritos, os ensaios, as metodologias, a técnica de cada análise e os equipamentos utilizados na caracterização do efluente.

Para a caracterização da incrustação observada nas paredes do concreto do vertedouro pós UASB e nos corpos de prova envelhecidos foi realizado o ensaio de fluorescência de raio x, com o equipamento Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrophotometer EDX 720 da Shimadzu.

Quadro 3 - Ensaio, métodos, técnicas de análise e equipamentos utilizados para caracterização do efluente.

<b>Ensaio</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Técnica de análise</b>	<b>Equipamento</b>
pH	APHA 4500-H+B	Potenciometria	pHmetro WTW
Temperatura	APHA 2550-A	Sensor infra - vermelho	Pirômetro ótico Raytek Raynger
Condutividade	APHA 2510-A	Condutivimetria	Condutivímetro WTW
Acidez	APHA 2310-B	Titulometria	Titulador eletrônico Schott.
Alcalinidade	APHA 2320-A	Titulometria	Titulador eletrônico Schott.
Sulfato	APHA 2340-C	Turbidimetria	Turbidímetro Turbiquant
Sulfeto	APHA 4500-G	Potenciometria	Eletrodo seletivo Orion

Fonte: Autoria própria (2016).

## 5.5 CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO LAMINADO

Nesta seção serão apresentados os ensaios que foram utilizados para a caracterização do compósito estudado.

### 5.5.1 Densidade volumétrica do PRFV

Este ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D792-13 mediante a Equação 6, fazendo uso de uma balança analítica, marca Bioprecisa FA2104N, com resolução de 0,1 mg, conforme Figura 23.

$$D = \frac{a * 0,9975}{(a + w - b)} \quad (6)$$

Onde:

$D$ = Densidade do compósito em  $g/cm^3$ ;

$a$ = Peso da amostra seca em g;

$w$ = Peso do suporte da amostra imerso em água destilada sem a amostra em g;

$b$ = Peso do suporte com amostra imersa em água destilada em g.

Figura 23 – Pesagem do CP para o ensaio de densidade do compósito.



Fonte: Autoria própria (2016).

### 5.5.2 Determinação das frações volumétricas de reforço, matriz e teores de vazios do PRFV

Foi utilizado o ensaio de calcinação para a determinação das frações volumétricas do compósito utilizado.

#### 5.5.2.1 Calcinação

Este ensaio visa determinar as frações volumétricas de reforço (fibra de vidro), matriz (resina) e vazio e foi realizado conforme a ASTM D3171-15. Os CP, foram pirolizados e colocados em um forno do tipo mufla, marca Fornitec, por um período de 40 min, com temperatura de 750 °C, ao término do ensaio foi possível determinar a massa residual de fibras e assim calcular os outros teores de matriz e vazios seguindo a respectiva norma, de acordo com as equações (7) e (8).

$$M_f = \frac{m_f}{m_t} \quad (7)$$

Onde:

$M_f$ = Porcentagem em peso de fibras;

$m_f$ = Peso da fibra após calcinação da matriz, em g;

$m_t$ = Peso total da amostra, em g.

$$M_m = (1 - M_f) \quad (8)$$

Onde:

$M_m$ = Porcentagem em peso de resina (matriz);

$M_f$  = Porcentagem em peso de fibra;

Com os resultados das equações anteriores é possível determinar os teores em volumes do compósito, segundo das equações (9),(1) e ( ).

$$V_f = \frac{(D * M_f)}{D_f} \quad (9)$$

Onde:

$V_f$  = Teor em volume de fibra;

$D$  = Densidade do compósito, obtida através da equação 1, em  $g/cm^3$ ;

$M_f$  = Teor em peso de fibra, em g;

$D_f$  = Densidade da fibra, em  $g/cm^3$ .

$$V_m = \frac{(D * M_m)}{D_m} \quad (10)$$

Onde:

$V_m$  = Porcentagem em volume da resina (matriz);

$D$  = Densidade do compósito, em  $g/cm^3$ ;

$M_m$  = Porcentagem em peso da resina;

$D_m$  = Densidade da matriz, em  $g/cm^3$ .

$$V_v = 1 - (V_f + M_m) \quad (11)$$

Onde:

$V_v$  = Porcentagem em volume de vazios;

$V_f$  = Porcentagem em volume de fibras;

$M_m$  = Porcentagem em volume de resina.

## 5.6 MECANISMO DE ENVELHECIMENTO

Para o processo de envelhecimento no compósito, a avaliação do envelhecimento sofrido foi executada a cada quatro 04 meses de exposição na ETE, compreendendo um período total de avaliação de 8 meses. Após o período de envelhecimento foram realizadas avaliação morfológica, avaliação da integridade estrutural dos compósitos, desempenho mecânico e da caracterização da fratura final.

### 5.6.1 Avaliação morfológica do PRFV

Esta avaliação tem como objetivo avaliar alguma falha que tenha ocorrido na fabricação do compósito, e também avaliar desgaste superficial durante o processo

de envelhecimento dos CP na ETE. A seguir serão detalhados os respectivos procedimentos utilizados.

#### 5.6.1.1 Scanner

Este procedimento avalia alterações na coloração e qualquer outra mudança ocorrida na superfície do compósito, antes e após a exposição na ETE. Para a realização deste ensaio os CP foram digitalizados, utilizando um scanner, marca HP photosmart C4280.

#### 5.6.1.2 Microscopia eletrônica de varredura

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), nesse caso tem como objetivo verificar morfologicamente a interface matriz/fibra, fissuras, fendas, arranques de fibra, dentre outros que o material possa ter sofrido antes e após da exposição com o efluente. Esta análise foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura, marca *Shimadzu*, modelo Superscan SSX-550.

### 5.6.2 Avaliação da integridade estrutural do PRFV

Para a avaliação da integridade estrutural dos compósitos foi utilizada a técnica de medição da variação de massa (TMVM), para a avaliação das possíveis perdas de massa dos CP expostos ao efluente.

#### 5.6.2.1 Técnica de medição da variação de massa (TMVM)

Neste ensaio os corpos de prova são colocados em uma estufa por 24 horas a uma temperatura de  $50 \pm 3$  °C, em seguida foram pesados, em uma balança analítica, marca *Shimadzu*, modelo AW 220, com resolução de 0,1 mg e capacidade máxima de 220 g. Esta avaliação foi feita antes e depois da exposição dos CP de tração na ETE. O cálculo para essa determinação foi realizado seguindo a equação (12).

$$\Delta = \left( \frac{M_e - M_o}{M_o} \right) * 100 \quad (12)$$

Onde:

$\Delta$ = Variação da massa da amostra em %;

$M_e$ = Massa da amostra envelhecida em g;

$M_o$ = Massa da amostra no estado original em g.

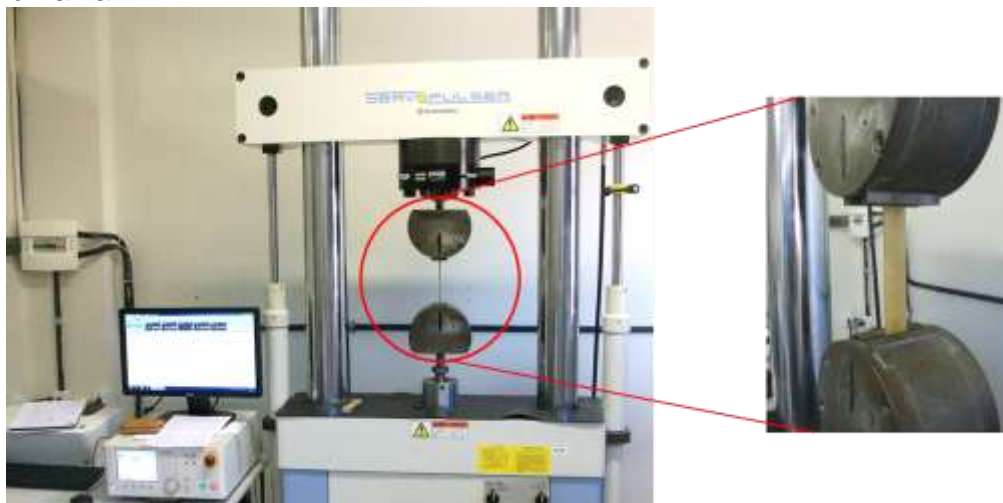
### 5.6.3 Desempenho mecânico do PRFV

Para a determinação do desempenho mecânico foram realizados os ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos, como descrito abaixo.

#### 5.6.3.1 Ensaio de tração uniaxial

Para a realização do ensaio de tração uniaxial foi utilizado o equipamento de Ensaio universal mecânico, modelo AGI-250 KN, com velocidade de carregamento de 1,0 mm/min, conforme a Figura 24, de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM D3039-14.

Figura 24 - Máquina de ensaio universal mecânico, com garras para o ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Autoria própria (2016).

Este ensaio foi realizado nos CP antes e depois da exposição no efluente, a fim de identificar a resistência última, a deformação de ruptura e o módulo de elasticidade longitudinal (medido na direção da aplicação da carga), esses valores foram obtidos segundo as equações (13), (14) e (15).



$$\sigma_t = \left( \frac{P}{A} \right) \quad (13)$$

Onde:

$\sigma_t$  = Tensão última de tração em MPa;

P = Carga aplicada em N;

A = Área da secção transversal do corpo de prova em mm<sup>2</sup>.

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (14)$$

Onde:

$\varepsilon$  = Deformação;

$\Delta L$  = Variação do comprimento em mm;

$L_0$  = Comprimento útil do corpo de prova em mm.

$$E = \left( \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \right) \quad (15)$$

Onde

E = Módulo da elasticidade longitudinal em GPa;

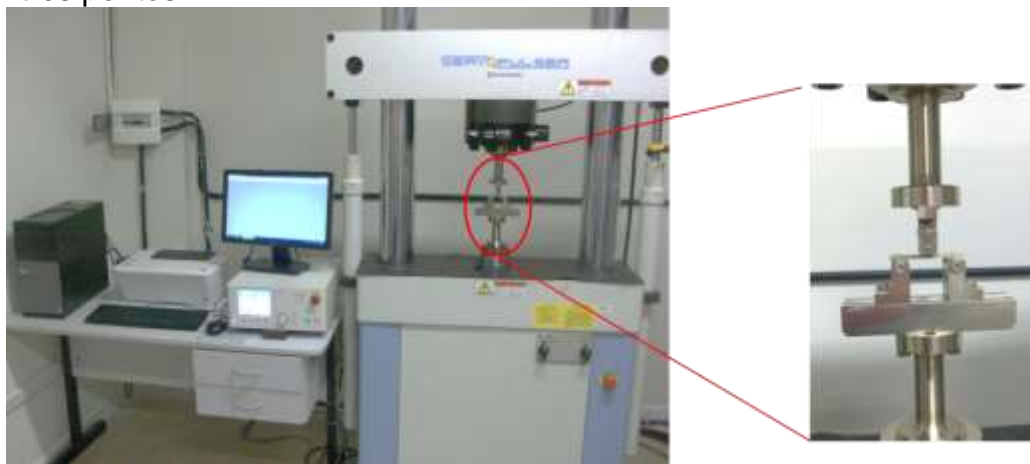
$\Delta \sigma$  = Variação da tensão na região linear em MPa;

$\Delta \varepsilon$  = Variação da deformação na região linear.

### 5.6.3.2 Ensaio de flexão em três pontos

Para a realização do ensaio de ensaios de flexão nos corpos de prova também foi utilizada o equipamento de Ensaio universal mecânico, modelo AGI-250 KN, Figura 25, conforme norma ASTM D790-10, com velocidade de carregamento de 1,0 mm/min, nos CP em seu estado original e após o período de exposição no efluente.

Figura 25 - Máquina de ensaio universal mecânica, com garras para o ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: Autoria própria (2016).

Foi obtido nesse ensaio a resistência a flexão, o módulo de elasticidade à flexão e a deflexão máxima do compósito, que foram calculados de acordo com as equações (16), (17) e (18).

$$\sigma_f = \left( \frac{3 * P * L}{2 * b * h^2} \right) \quad (16)$$

Onde:

$\sigma_f$  = Tensão de flexão em MPa;

P= Carga aplicada em N;

L= Distâncias entre os apoios em mm;

b= Largura do corpo de prova em mm;

h= Espessura do corpo de prova em mm.

$$\epsilon = \left( \frac{6 * D * h}{L^2} \right) \quad (17)$$

Onde:

$\epsilon$ = Deflexão máxima;

D= Flecha máxima no centro do corpo de prova em mm;

h= Espessura do corpo de prova em mm;

L= Distâncias entre os apoios em mm.

$$E = \left( \frac{m * L^3}{4 * b * h^3} \right) \quad (18)$$

Onde:

E= Módulo de elasticidade à flexão em %;

m= Tangente do ângulo da curva na região elástica na curva (carga x deslocamento) em N/mm;

L= Distâncias entre os apoios em mm;

b= Largura do corpo de prova em mm;

h= Espessura do corpo de prova em mm.

#### **5.6.4 Caracterização da fratura do PRFV**

A caracterização da fratura foi realizada nos CP ensaiados de tração e flexão, antes e após a exposição na ETE. Foi realizada a caracterização macrográfica mediante codificação, seguindo a norma ASTM D3039-14 para o caso dos CP fraturados de tração uniaxial. Já a caracterização micrográfica foi realizada utilizando o MEV tanto para os CP fraturados após a realização dos ensaios de tração uniaxial como de flexão em três pontos, no estado original e após o envelhecimento, objetivando verificar detalhes como excesso de resina e alguns danos no compósito como delaminação, ruptura de fibra, além da interface fibra/matriz.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 ANÁLISE DO EFLUENTE DO UASB**

A caracterização média do efluente é apresentada na Tabela 2. A concentração dos parâmetros analisados, juntamente com os demais íons presentes no efluente facilitam no transporte do oxigênio para o interior do compósito, causando a sua progressiva deterioração ao longo do tempo. (FAN, 2016; AGNELLI, CHINELATTO, 1992).

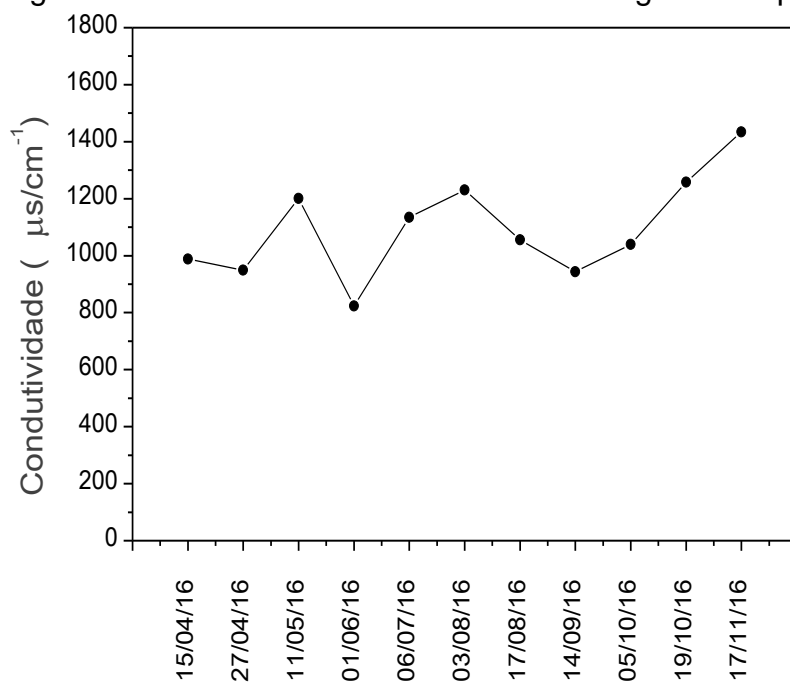
**Tabela 2 - Caracterização média do efluente pós UASB na ETE do Sistema Central de Natal/RN.**

<b>Ensaio</b>	<b>Concentração</b>
pH	6,81
Condutividade	1095,82 $\mu\text{s}/\text{cm}^{-1}$
Temperatura	29,55 °C
Sulfato	7,11 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$
Sulfeto	0,23 mg $\text{S}^{2-}/\text{L}$
Acidez	42,17 mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$
Alcalinidade	222,04 mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$

Fonte: Autoria própria (2017).

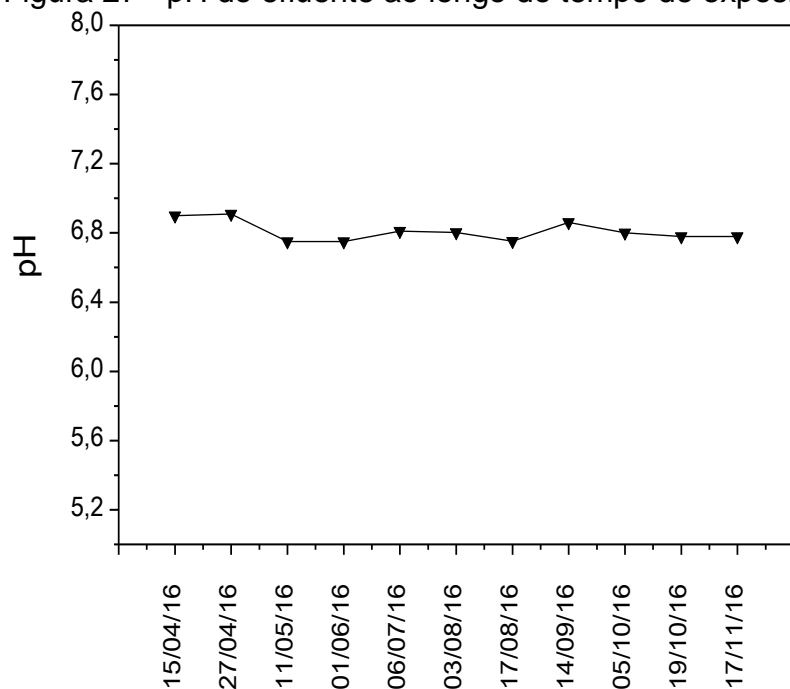
Durante o período em que os corpos de prova ficaram expostos na ETE não houve significativa alteração nos parâmetros pH, condutividade e temperatura, conforme pode ser observado nas figuras 26, 27 e 28. A atividade dos íons de hidrogênio no efluente, variaram de 6,75 a 6,91, ou seja, levemente ácido. A condutividade, capacidade de uma solução produzir corrente elétrica, em função da concentração de íons presentes nesta, conforme American Public Health Association (2012), variou de 823 a 1258  $\mu\text{s}/\text{cm}^{-1}$  e a temperatura média do efluente obteve valores entre 28,2 a 30,9 °C.

Figura 26 - Condutividade do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.



Fonte: Autoria própria (2017).

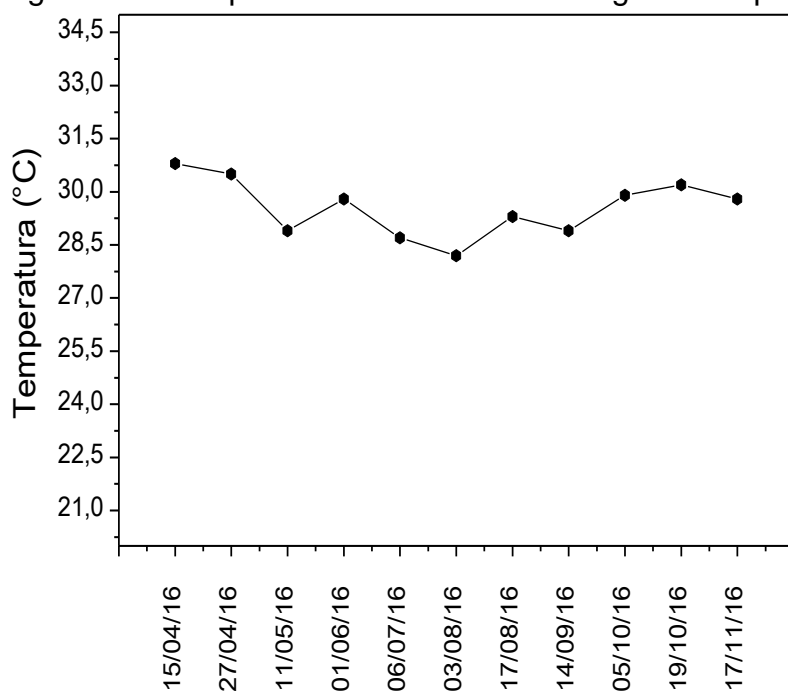
Figura 27 - pH do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.



Fonte: Autoria própria (2017).

O pH e a temperatura são importantes parâmetros no controle dos processos durante do tratamento de efluentes, uma vez que equacionam os processos químicos e biológicos.

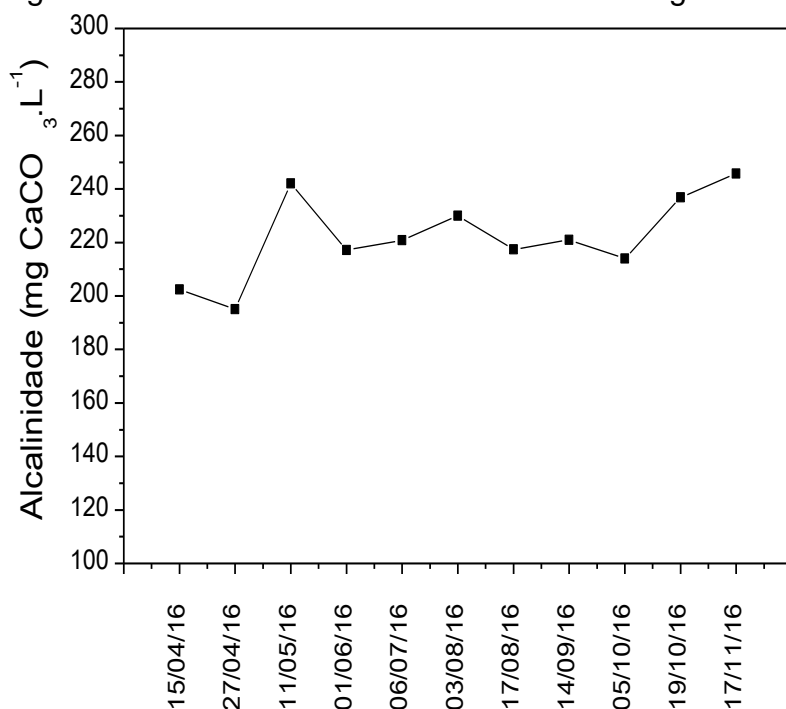
Figura 28 - Temperatura do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.



Fonte: Autoria própria (2017).

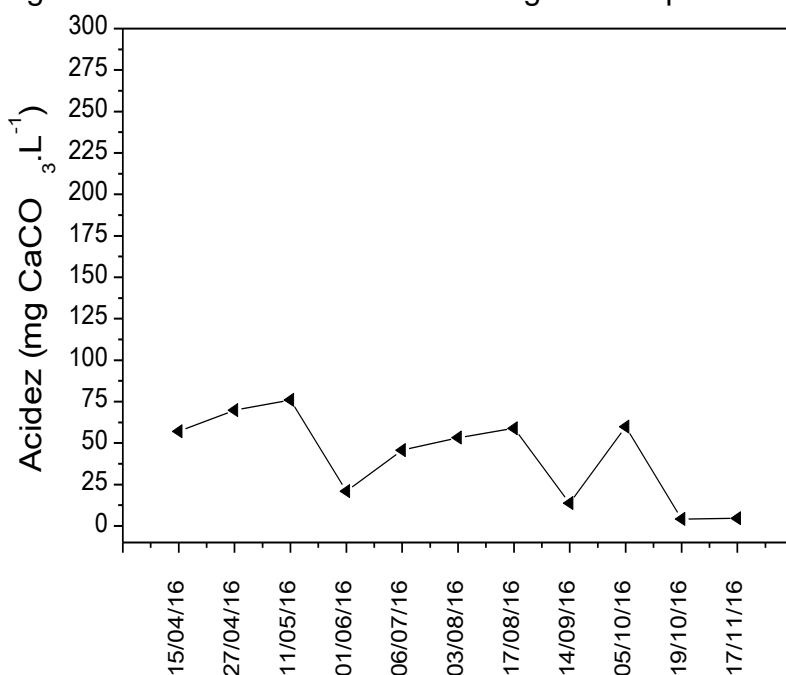
Nas figuras 29 e 30, tem-se a concentração de alcalinidade e de acidez do efluente em que o PRFV manteve contato direto e indireto, e é possível verificar que a alcalinidade se manteve entre 195,04 e 245,75 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ , sendo considerada dentro de faixa, segundo Sperling (2005), que é de 100 a 250 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  para efluentes bruto. Já a acidez variou de 4,22 a 69,82 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  durante o período monitorado.

Figura 29 - Alcalinidade total do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 30 - Acidez do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.

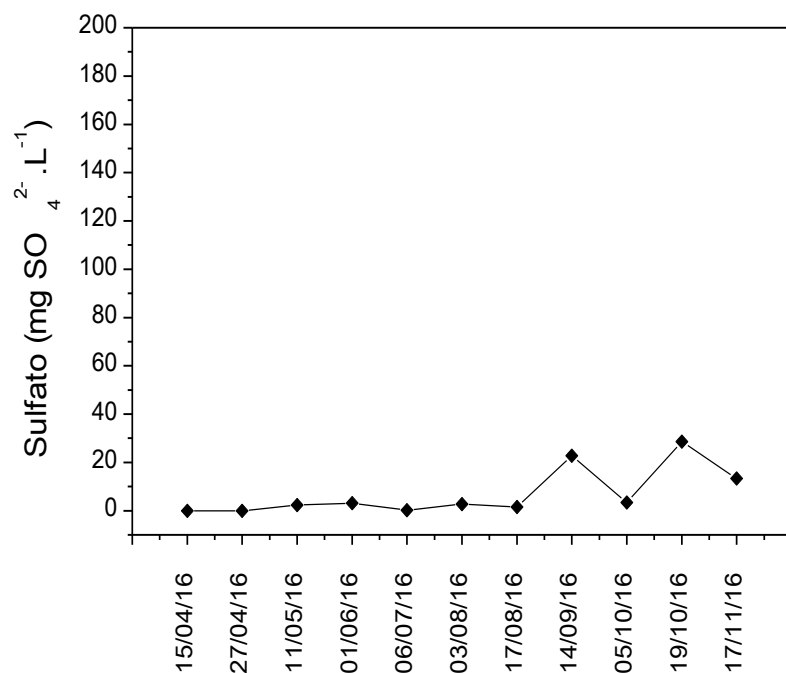


Fonte: Autoria própria (2017).

Durante o período de monitoramento as concentrações de sulfato no efluente variaram de 0,18 a 28,65 mg de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, e as de sulfeto dissociado variaram de 0,04 a 0,73 mg de S<sup>2-</sup>, conforme as Figuras 31 e 32. De acordo com os estudos de Glória

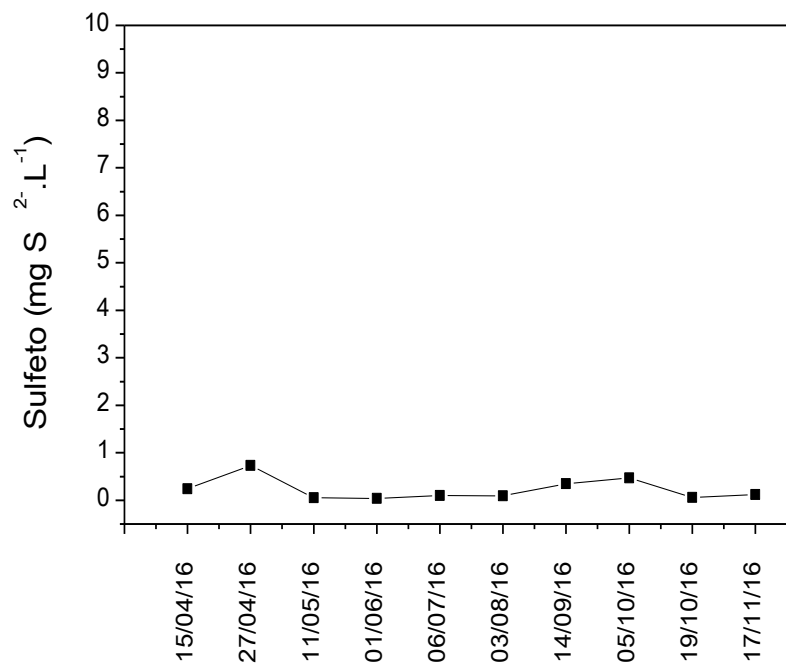
(2009) a concentração de sulfeto de hidrogênio nos reatores UASB pode ser de 0,2 a 5 ppm.

Figura 31 - Concentração de sulfato do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 32 - Concentração de sulfeto do efluente ao longo do tempo de exposição dos PRFV.



Fonte: Autoria própria (2017).



## 6.2 ANÁLISE DO COMPÓSITO

### 6.2.1 Caracterização do compósito

Na Tabela 3 apresenta-se a caracterização do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro E, quanto aos teores de reforço, vazios e matriz, bem como a sua densidade. A partir dos resultados apresentados, observa-se que os teores de vazios se encontram dentro dos valores conforme literatura (HULL, CLYNE, 1996).

**Tabela 3 - Frações volumétricas de reforço, vazios e matriz do PRFV.**

	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de fibra de vidro (%)	Teor de matriz (%)	Teor de vazios (%)
Compósito (PRFV)	1,46 ± 0,01	19,00 ± 1,00	79,00 ± 1,00	2,00 ± 0,01

Fonte: Autoria própria (2017).

### 6.2.2 Avaliação morfológica

Na análise da superfície do compósito, realizada através a visualização macroscópica com o scanner, foi possível observar a ocorrência de uma discreta mudança de coloração, com um tom mais escuro, levemente amarelado nos corpos de prova envelhecidos e a tendência do aparecimento das fibras na superfície, sendo evidenciada pelas marcas profundas desses reforços, conforme Tabela 4.

A zona de oxidação se desenvolve a partir da superfície exposta em direção ao interior do material, segundo Liang e Pochiraju (2015), e é esperado que seja mais rápido ao longo da fibra, devido à maior difusão do oxigênio nessa direção. Tal constatação foi observada tanto para os corpos de prova acima e imerso ao efluente.

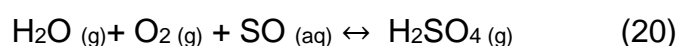
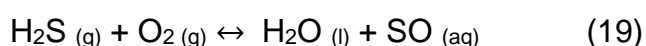
**Tabela 4 - Análise da superfície do PRFV.**

Condição de exposição	0 dias (Estado original)	4 meses (Estado envelhecido)	8 meses (Estado envelhecido)
PRFV acima ao efluente			
PRFV imerso no efluente			

Fonte: Autoria própria (2017).

A alteração na cor do compósito, quando submetido ao envelhecimento ambiental, é um indicativo de oxidação. Este fenômeno pode ser minimizado fazendo aplicando uma camada de gel coats externamente (FELIPE, 2012a). Neste caso como o local onde estavam expostos os corpos de prova era protegido da radiação solar, é atribuído essa mudança de coloração principalmente a oxidação térmica, química ou biológica (NICHOLAS et al, 2016).

Um exemplo de oxidação que ocorre em sistemas de tratamento de efluentes é a oxidação por meio de formação de ácido por via química e biológica. A formação de ácidos via química obedece à seguinte sequência de reações:



Da equação (19), o oxigênio necessário para a reação, disponível no meio, resulta na formação do enxofre absoluto, que em presença de umidade, oxida-se a ácido sulfúrico, equação (20).

Na equação (21), reação de neutralização, o produto da reação (20) reage com o carbonato de cálcio para formar outro ácido, que também degrada as estruturas da estação. (FORTUNATO, 2017).



O envelhecimento químico nos compósitos poliméricos inclui principalmente, as mudanças químicas na estrutura do polímero devido a variação da temperatura e pela presença de oxigênio, bem como, a deterioração progressiva da matriz e da interface fibra/matriz, sob a forma de cisão da cadeia, perda de massa, fissuras e oxidação dos elementos que contem carbono (ASTM D3171, 2015).

A reação do polímero com o oxigênio ocorre preferencialmente na superfície do polímero e em menor escala em seu interior. Esta reação é lenta na temperatura ambiente, mas, se acelera em altas temperaturas, devido a maior difusão do oxigênio nestas temperaturas. Esta reação gera produtos carbonilados, que têm coloração amarelada, e são os responsáveis pela alteração da cor do produto. (CANEVAROLO JR, 2006; PAOLI, 2008).

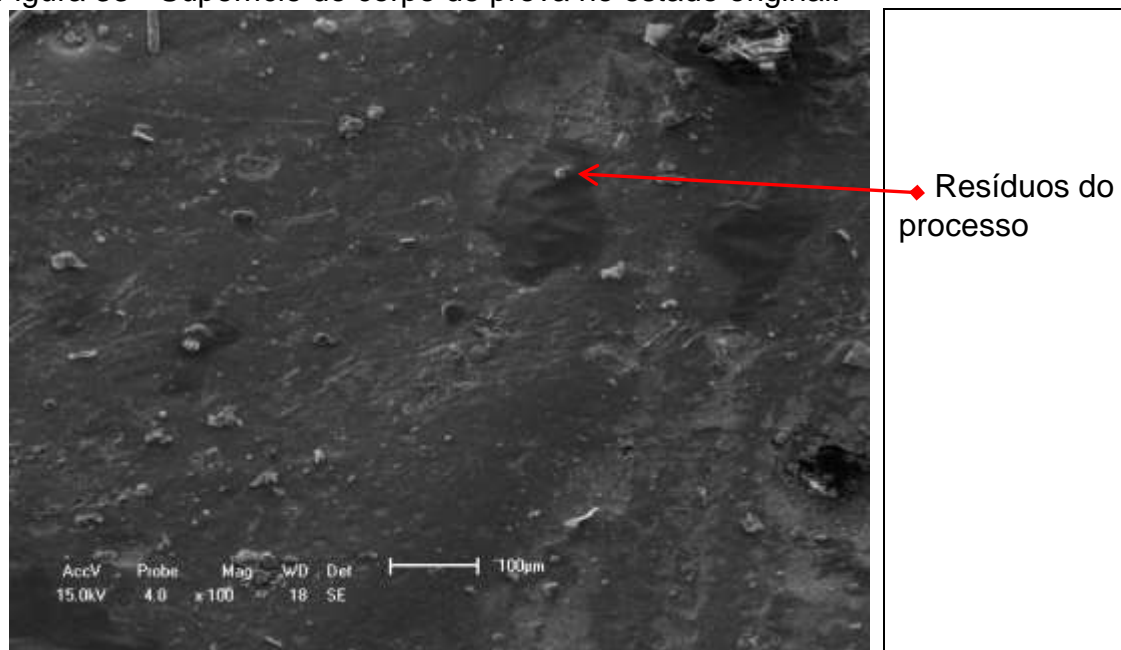
Compósitos poliméricos quando imersos em líquidos, o mecanismo de dano se dá pela osmose, onde a concentração mais elevada do líquido migra para o de menor concentração (compósito), provocando mudanças na coloração do compósito e nas propriedades mecânicas. (HODZIC et al, 2004).

Para avaliação dos aspectos morfológicos na superfície do PRFV, essas propriedades foram analisadas tanto no estado original, quanto após os tempos de exposição, com o objetivo de verificar a intensidade do desgaste superficial.

#### 6.2.2.1 Análise da superfície do PRFV

A Figura 33 mostra a superfície do PRFV uniforme e íntegra, apresentando apenas alguns pontos de incrustações devido ao processo de fabricação.

Figura 33 - Superfície do corpo de prova no estado original.



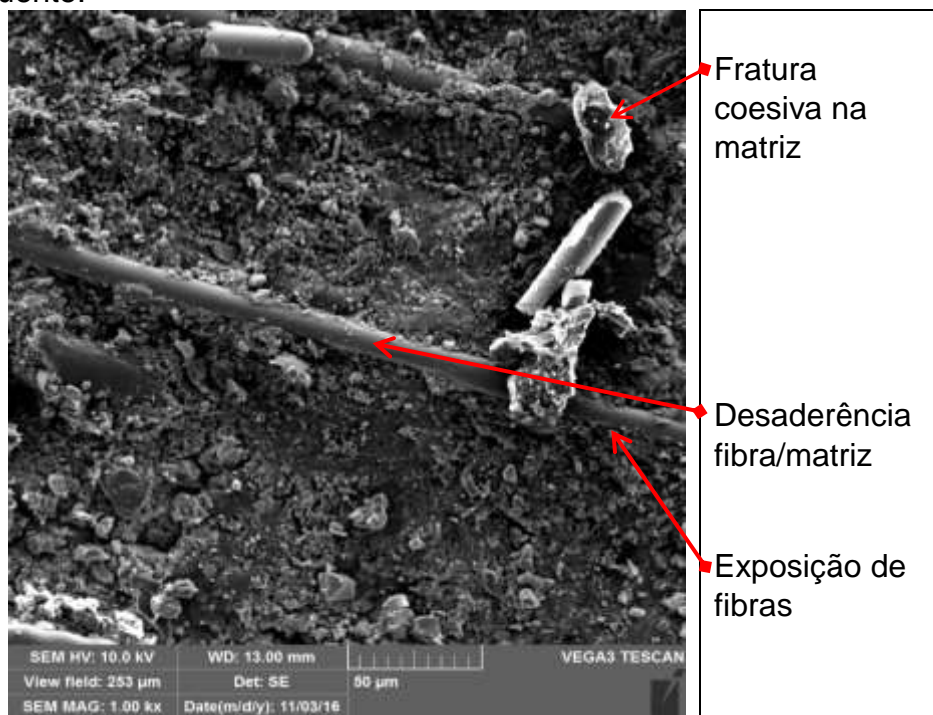
Fonte: Autoria própria (2017).

## 6.2.2.2 Análise da superfície do PRFV após 4 meses de exposição

### 6.2.2.2.1 Acima do efluente

Após o período de exposição dos corpos de prova acima do efluente, observa-se, na Figura 34, exposição e ruptura de fibra de vidro, desaderência fibra/matriz e fratura coesiva na matriz.

Figura 34 - Superfície do corpo de prova envelhecido por 4 meses acima do efluente.



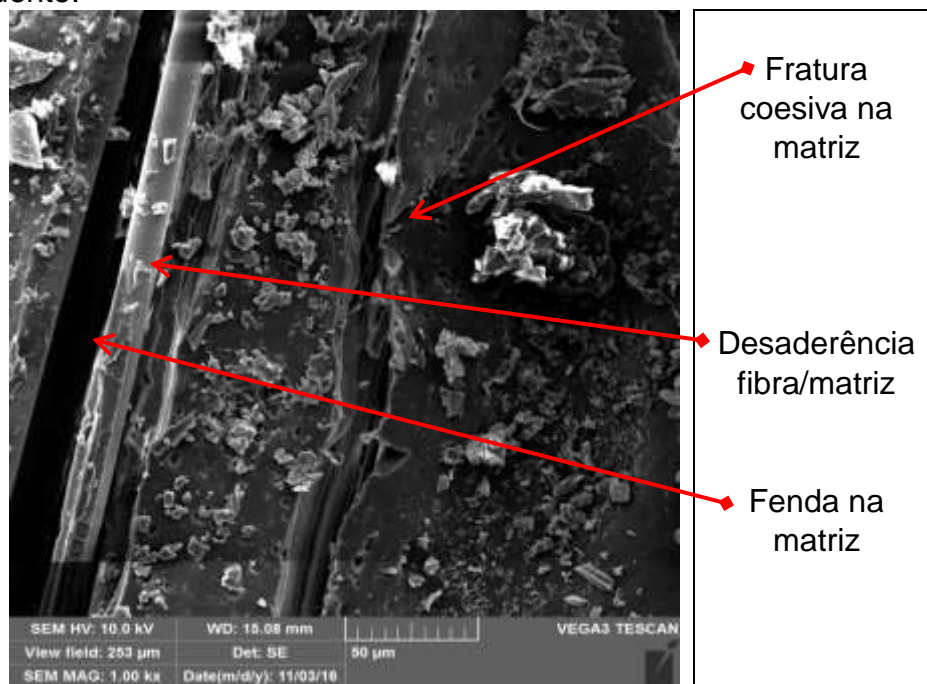
Fonte: Autoria própria (2017).

#### 6.2.2.2.2 *Imerso no efluente*

A

Figura 35 mostra a superfície do corpo de prova após o período de exposição quando colocado imerso no efluente da estação de tratamento, durante 4 meses, e verifica-se na superfície do CP fraturas do tipo coesiva e adesiva na matriz.

Figura 35 - Superfície do corpo de prova envelhecido por 4 meses, imerso no efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

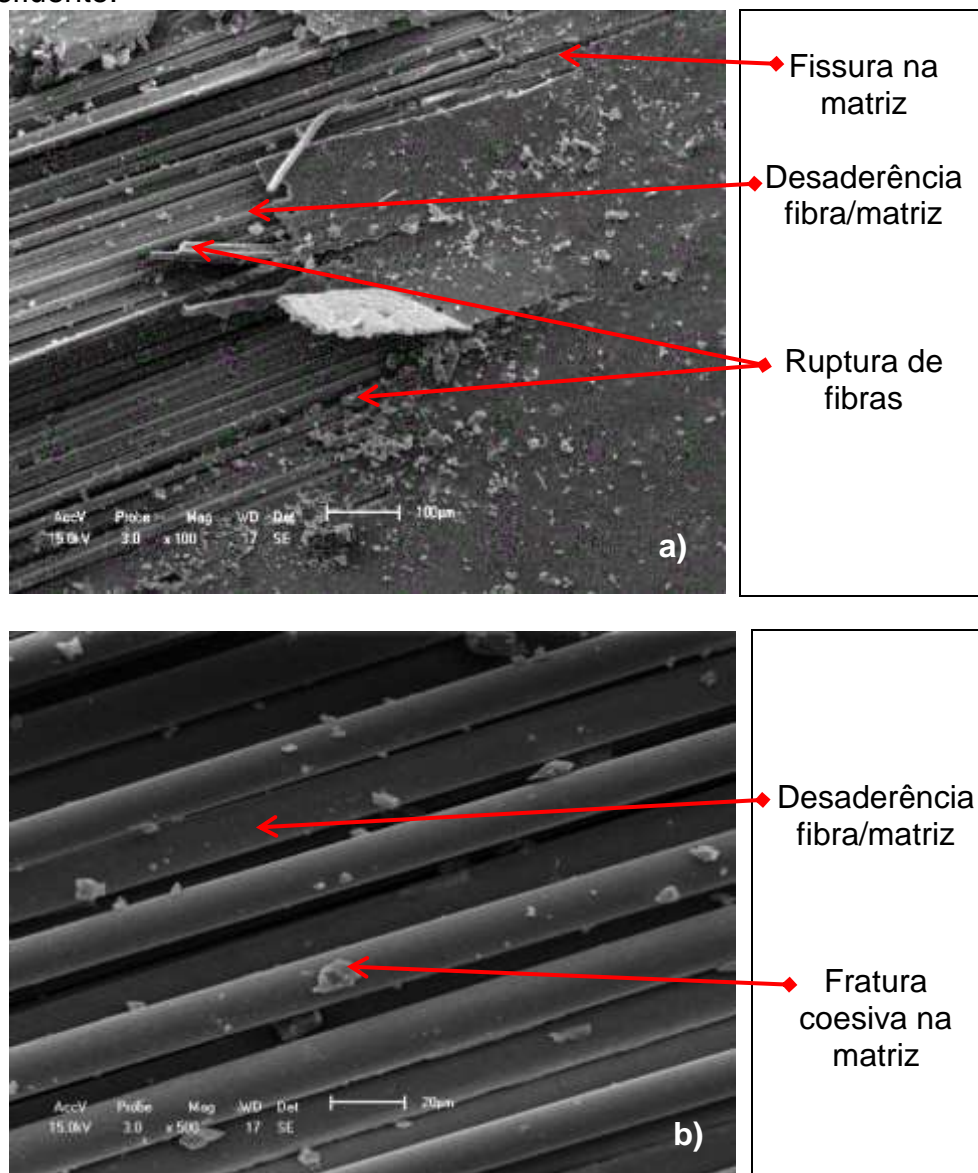
Diante disso, é possível observar que houve um maior desgaste na superfície do CP quando imerso no efluente, isso pode ser justificado, devido ao fluxo do esgoto que ao passar pela superfície do CP tende a desgastar o material, provando fenda na matriz, devido a retida da fibra de vidro; e ainda essa fenda também ocasiona a desaderância na interface fibra/matriz. Conforme Leão, Tino e Aquino (2015) a deterioração superficial provocado pelo envelhecimento ambiental nos compósitos de matriz polimérica provoca variações dimensionais no material do tipo exposição do reforço, formação de sulcos e ranhuras na matriz, como também o aparecimento de micro e macro fraturas na matriz, danos semelhantes aos encontrados neste estudo.

### 6.2.2.3 Análise da superfície do PRFV após 8 meses de exposição

#### 6.2.2.3.1 Acima do efluente

A Figura 36 mostra a imagem da superfície do CP exposto por 8 meses, quando exposto acima do efluente pós UASB, observa-se na figura 35(a) ocorrência de exposição e ruptura das fibras de vidro, fissura na matriz e ainda desaderência fibra/matriz; e na figura 35(b) fratura coesiva na matriz além da desaderência fibra/matriz.

Figura 36 - Superfície do corpo de prova envelhecido por 8 meses, acima do efluente.

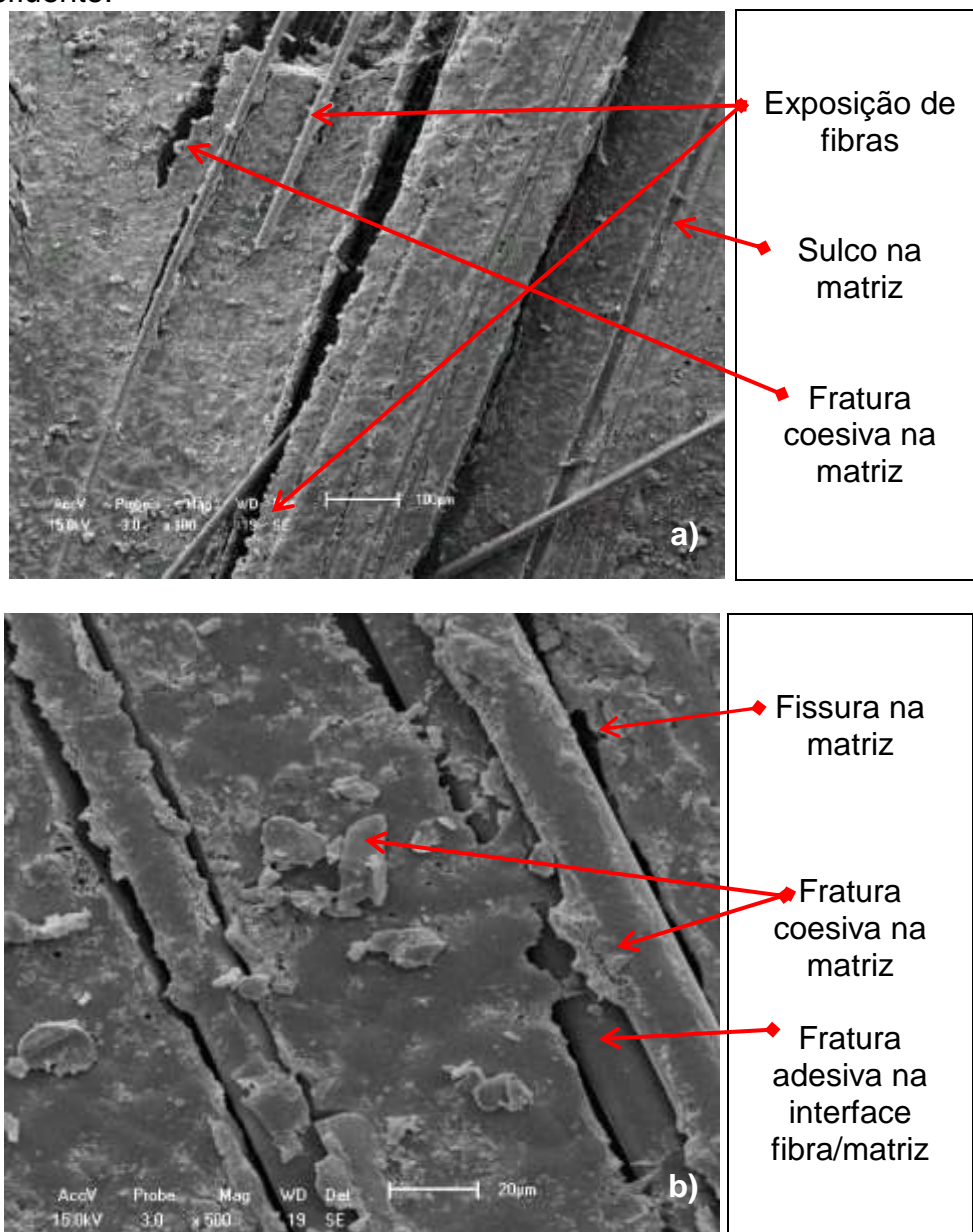


Fonte: Autoria própria (2017).

#### 6.2.2.3.2 *Imerso no efluente*

Na Figura 37 observa-se a imagem da superfície do CP exposto por 8 meses quando imerso no efluente, é possível notar a exposição e arranque das fibras de vidro, fraturas coesivas na matriz e sulco na matriz provocada pelo arranque das fibras de vidro conforme figura 36(a) e na figura 36 (b) é possível notar que a fissura caminha ao longo da fibra, provocando desaderência da fibra na matriz e ainda a fratura coesiva na matriz, sendo evidenciada pela preseça de alguns pontos de matriz na superfície da fibra.

Figura 37 - Superfície do corpo de prova envelhecido por 8 meses, imerso no efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

Desta forma, observa-se que o material após o processo de exposição de 8 meses no efluente e nas condições de imersão, sofreu uma grande quantidade de dano, provocado principalmente pela passagem do fluido nos corpos de prova e além disso, provocando um dano mecânico no respectivo material.

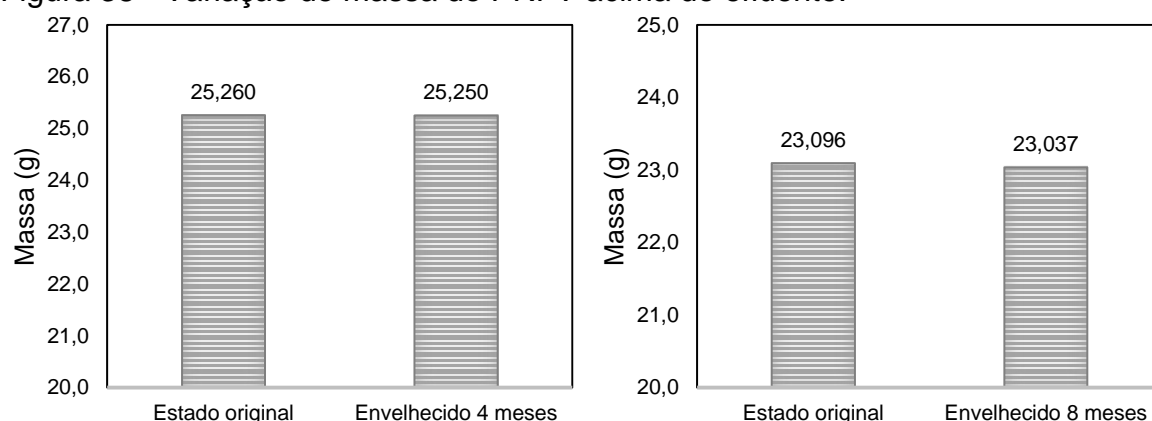
A imersão de compósito em líquidos, ou até mesmo sua exposição em ambientes com elevada umidade provoca aumento das fendas, de vazios e a maior entrada de água no material, devido à atividade dos ions da água que altera a cinética de transporte no compósito. (SILVA, 2012).



### 6.2.3 Avaliação da Instabilidade Estrutural

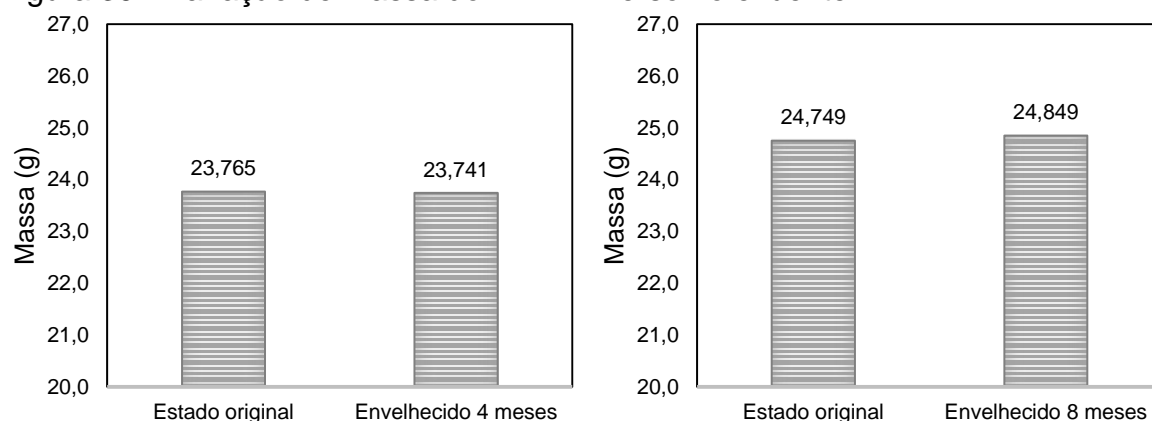
Nas Figuras 38 e 39, são apresentados os valores das variações de massa dos CP antes e após exposição. Foi verificado que após o período de exposição praticamente não houve perda de massa no CP envelhecido, esse resultado é muito positivo, uma vez que, o compósito se mantém aparentemente íntegro quando avaliado apenas o valor da massa, isso para a condição de exposição acima do efluente, Figura 38. No entanto, para os CP imersos no efluente, figura 39, observa-se após o período de 8 meses de imersão no efluente, que houve um pequeno ganho de massa, sendo evidenciado pela presença de incrustações brancas na superfície conforme Figura 3940.

Figura 38 - Variação de massa do PRFV acima do efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 39 - Variação de massa do PRFV imerso no efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

Durante o período de envelhecimento ambiental houve incrustação de óxido de enxofre no PRFV imerso no efluente, assim como, nas paredes de concreto da ETE,

Figura 40, sendo evidenciado, essa incrustação pela cor meio embranquecida nas superfícies dos corpos de prova. Esse material foi coletado e analisado, por fluorescência de raio-x, e foi verificado um percentual mássico de 95,1 % para  $\text{SO}_3$ , segundo a Tabela 5, por isso esse leve aumento da massa do CP após o período de imersão de 8 meses.

Figura 40 - CP retirados após 8 meses de exposição a) acima do efluente; b) imerso no efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

**Tabela 5 - Concentração mássica do material incrustado nas paredes de concreto da ETE.**

Compostos analisados	Percentual mássico na amostra (%)
$\text{SO}_3$	95,109
$\text{P}_2\text{O}_5$	3,275
$\text{SiO}_2$	0,969
$\text{CaO}$	0,585
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,055
$\text{CuO}$	0,006

Fonte: Autoria própria (2017).

## 6.2.4 Avaliação do desempenho mecânico

### 6.2.4.1 Ensaio de tração uniaxial

Os valores das propriedades de tração foram determinados a partir da média de cinco corpos de prova, conforme estabelecido na norma ASTM D3039-14. O módulo de elasticidade foi calculado a 50% da deformação total sofrida pelo material.

Nas tabelas 6 e 7 é possível observar as propriedades mecânicas de tração uniaxial do material, antes e após o processo de envelhecimento na ETE. No que se refere ao envelhecimento dos CP quando exposto acima do efluente; e comparando os resultados após 4 e 8 meses de exposição com o estado original, verifica-se na tabela 9, que o limite de resistência manteve-se constante, quando considerados os respectivos desvios padrões; e com relação ao módulo de elasticidade e a deformação houve uma pequena variação. Diante disso, pode se afirmar que ao término do período de envelhecimento de 8 meses, para a condição acima do efluente, houve um pequeno aumento da rigidez e conseqüentemente uma leve queda na deformação.

**Tabela 6 - Propriedades de tração uniaxial do PRFV acima do efluente.**

<b>Condição de Ensaio</b>	<b>Limite de resistência (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Deformação de ruptura (%)</b>
<b>PRFV estado original</b>	90,45 ± 11,87	1,89 ± 0,13	4,78 ± 0,43
<b>PRFV (4 meses)</b>	89,53 ± 5,10	2,10 ± 0,28	4,32 ± 0,54
<b>PRFV (8 meses)</b>	89,21 ± 4,60	2,00 ± 0,29	4,54 ± 0,65

Fonte: Autoria própria (2017).

Analisando a tabela 7, referente as condições dos CP quando imerso no efluente, observa-se que o limite de resistência permaneceu praticamente constante, considerando os desvios padrões, e ao término dos 8 meses de exposição, houve um aumento da rigidez de 22%, quando comparado com o estado original e com isso o material se deformou menos. Tais resultados corroboram com o estudo de Dao et al (2006), que mostra que compósitos submetidos a baixas temperaturas,  $\cong 70$  °C, o mecanismo de dano do compósito seria dominado por degradação de falhas simples e dessa forma influenciaria pouco nas propriedades físicas do compósito.

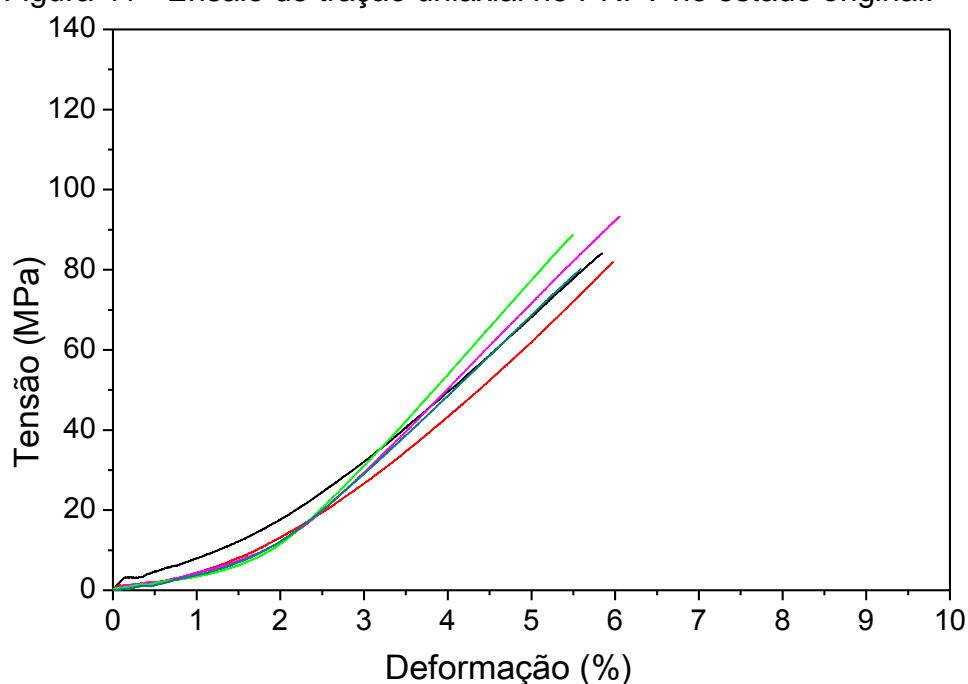
**Tabela 7 - Propriedades de tração uniaxial do PRFV imerso no efluente.**

Condição de Ensaio	Limite de resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação de ruptura (%)
<b>PRFV estado original</b>	90,45 ± 11,87	1,89 ± 0,13	4,78 ± 0,43
<b>PRFV (4 meses)</b>	89,64 ± 5,43	2,01 ± 0,11	4,45 ± 0,23
<b>PRFV (8 meses)</b>	91,30 ± 5,14	2,31 ± 0,15	4,00 ± 0,15

Fonte: Autoria própria (2017).

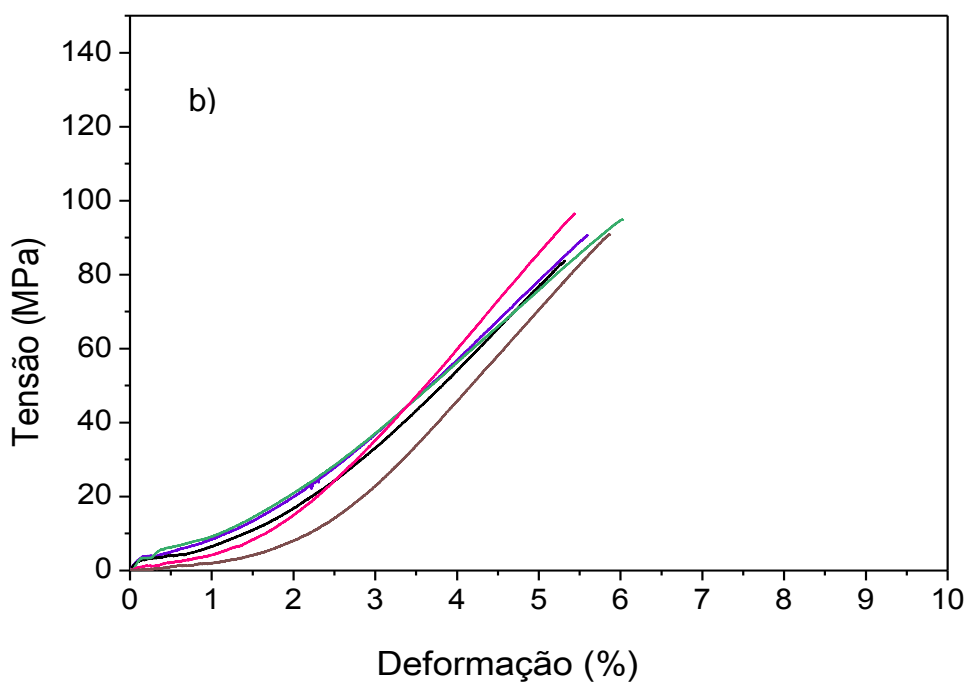
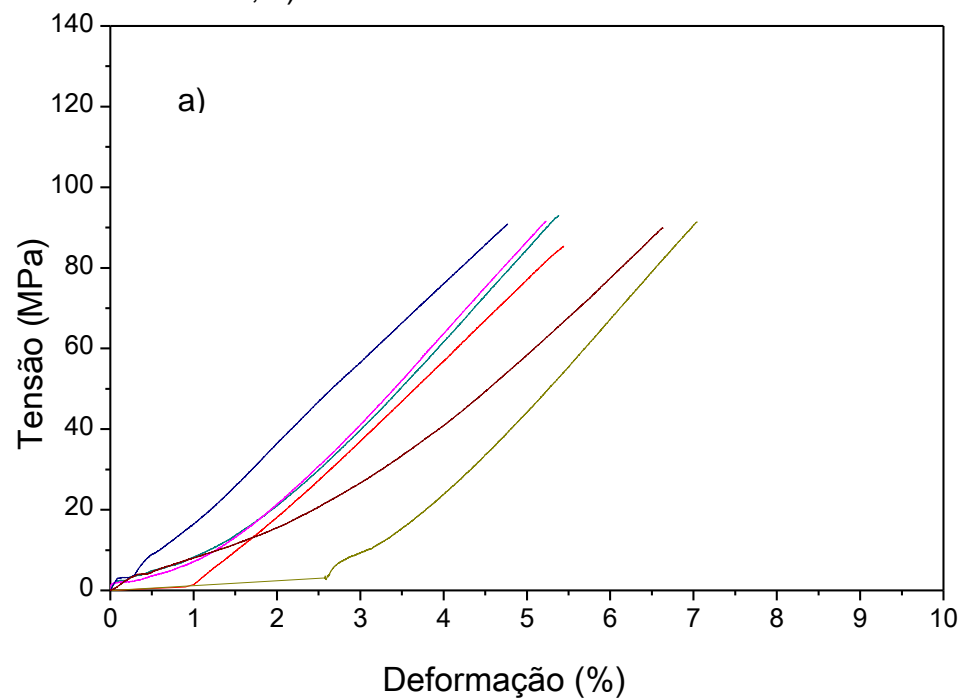
É possível observar o comportamento linear do material para o módulo de elasticidade, que foi obtido a 50% da deformação total sofrida pelo material em para todas as condições de ensaio, apresentando perfis semelhantes quanto ao comportamento, Figuras 41, 42 e 43.

Figura 41 - Ensaio de tração uniaxial no PRFV no estado original.



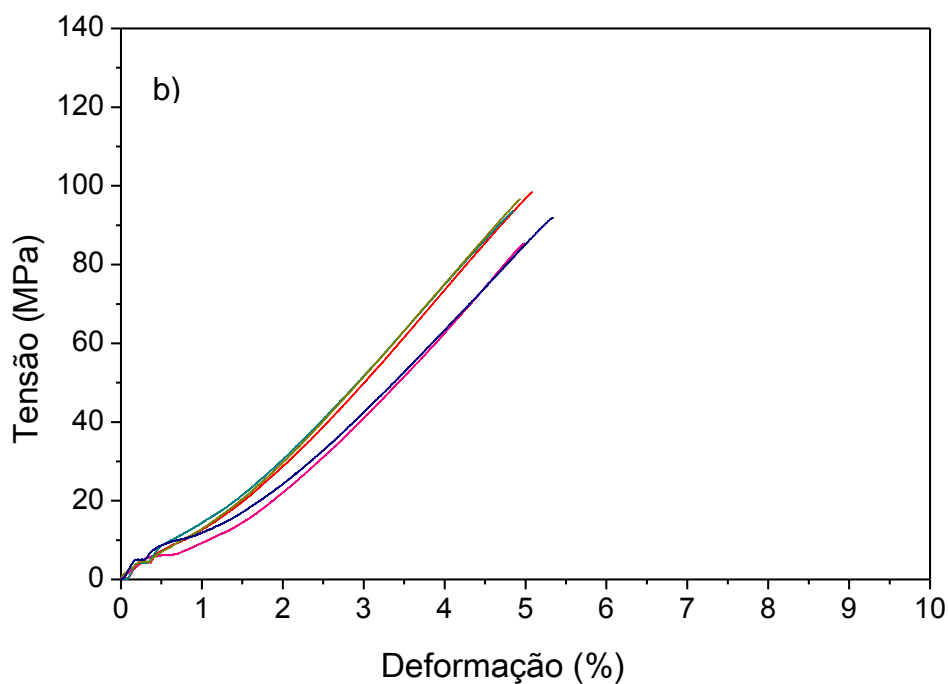
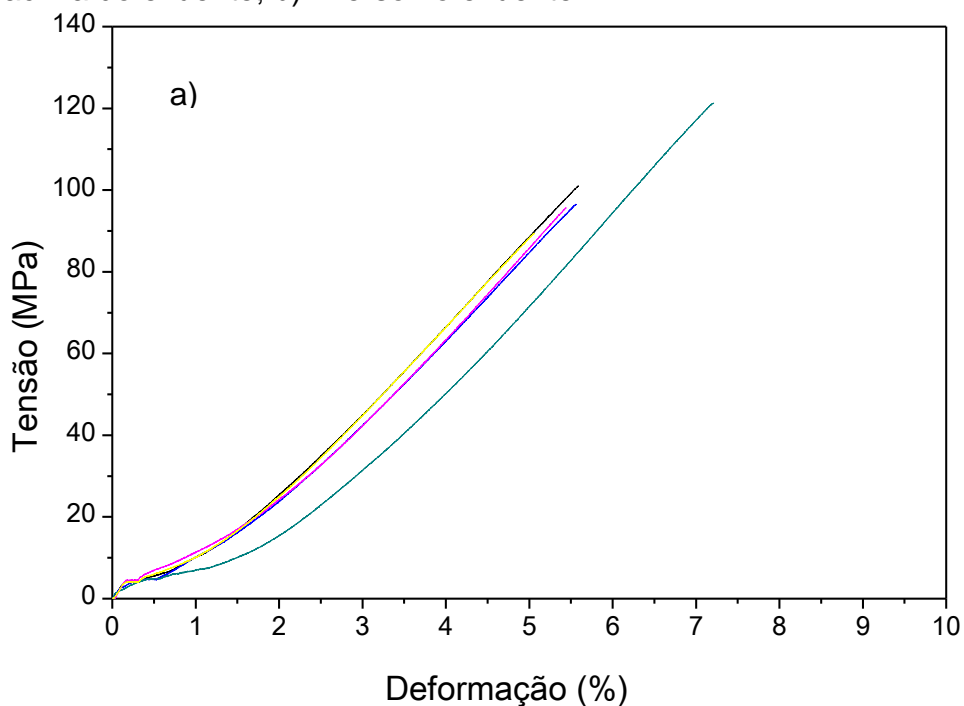
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 42 - Ensaio de tração uniaxial no PRFV envelhecido durante 4 meses a) acima do efluente; b) imerso no efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 43 - Ensaio de tração uniaxial no PRFV envelhecido durante 8 meses a) acima do efluente; b) imerso no efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

#### 6.2.4.2 Ensaio de Flexão em três pontos

As propriedades mecânicas do material para o ensaio de flexão em três pontos, antes e após o processo de envelhecimento na ETE, estão apresentados nas tabelas

8 e 9. Os valores das propriedades de flexão foram determinados a partir da média de cinco corpos de prova, conforme estabelecido na norma ASTM D790-10.

**Tabela 8 - Propriedades de flexão em três pontos do PRFV acima do efluente.**

Condição de Ensaio	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
<b>PRFV estado original</b>	214,90 ± 18,29	10,94 ± 2,38	2,00 ± 0,40
<b>PRFV (4 meses)</b>	207,00 ± 39,23	8,13 ± 2,07	2,60 ± 0,30
<b>PRFV (8 meses)</b>	203,00 ± 11,49	6,14 ± 0,45	3,30 ± 0,10

Fonte: Autoria própria (2017).

Conforme tabela 8, observa-se que a tensão máxima de flexão ao término do período de exposição caiu aproximadamente 5%, porém, considerando os respectivos desvios padrões, pode-se considerar inalterada. No entanto, ao se avaliar o módulo de elasticidade é possível verificar uma perda de aproximadamente 44%; e devido a essa perda de rigidez o material se deformou mais. Avaliando a tabela 9, em que o compósito ficou imerso no fluido, pode-se verificar que houve uma perda maior da tensão de flexão até o término do período de exposição quando comparado com o CP acima do fluido, sendo esta perda de aproximadamente 7%.

**Tabela 9 - Propriedades de flexão em três pontos do PRFV imerso no efluente.**

Condição de Ensaio	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
<b>PRFV estado original</b>	214,90 ± 18,29	10,94 ± 2,38	2,00 ± 0,40
<b>PRFV (4 meses)</b>	193,50 ± 36,06	8,95 ± 1,45	2,20 ± 0,2
<b>PRFV (8 meses)</b>	199,40 ± 18,96	6,15 ± 0,67	3,20 ± 0,3

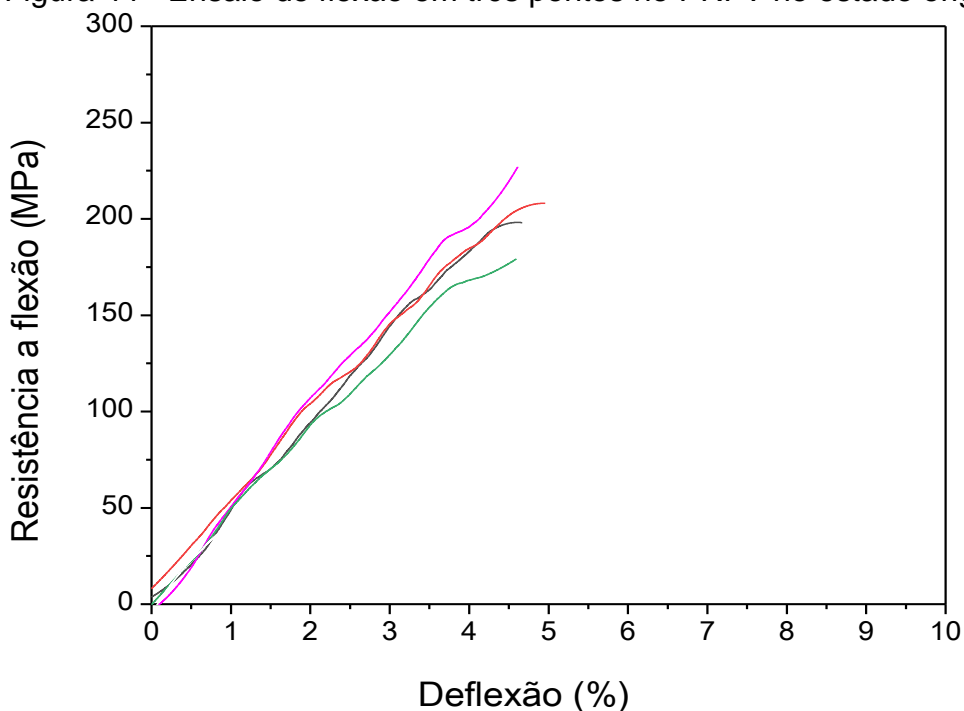
Fonte: Autoria própria (2017).

Segundo Peterson (2008) para temperaturas próximas à 25 °C, ou seja, temperatura ambiente, as tensões internas não são suficientes para a provocar danos na matriz do compósito. Evidenciando os resultados encontrados, Pillay, Vaidya e

Janowski (2009), também não encontraram alterações significativas nas propriedades de flexão ou impacto do compósito, houve integridade estrutural do material após o envelhecimento ambiental e não houve sinais de calcinação da matriz ou exposição de fibras na superfície do compósito. No entanto, também ocorreu oxidação do compósito.

O mesmo comportamento pode ser observado para os CP imersos aos efluentes. Nas figuras 44, 45 e 46 observa-se os gráficos do ensaio de flexão em três pontos para os CP acima e imerso ao efluente, no estado original, com 4 e 8 meses de exposição. A partir da análise dos gráficos, observa-se um comportamento praticamente linear para todas as condições de ensaio

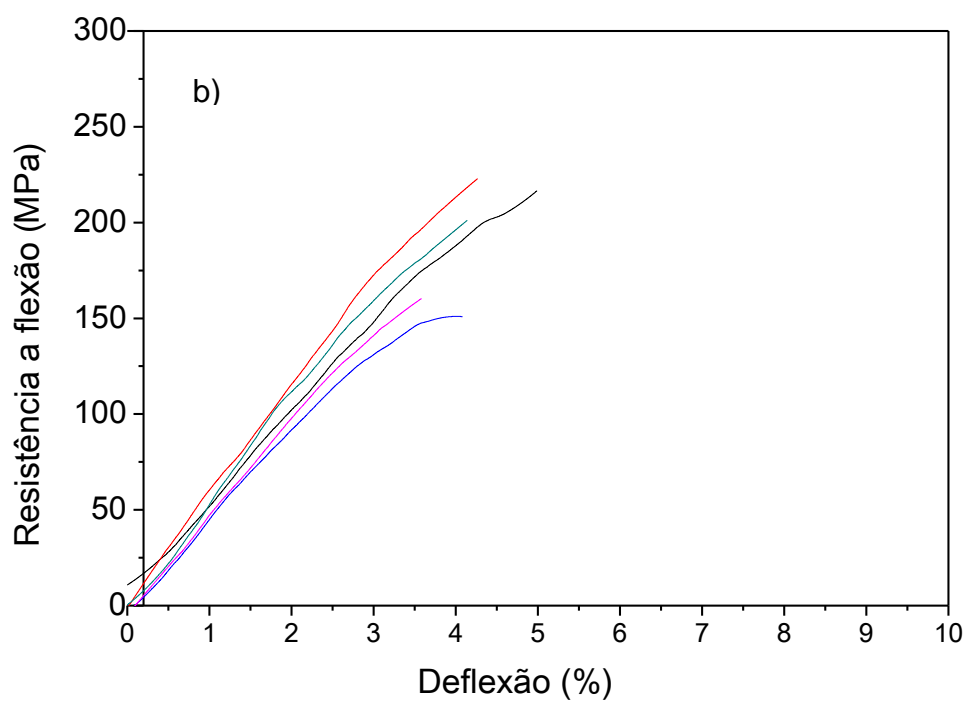
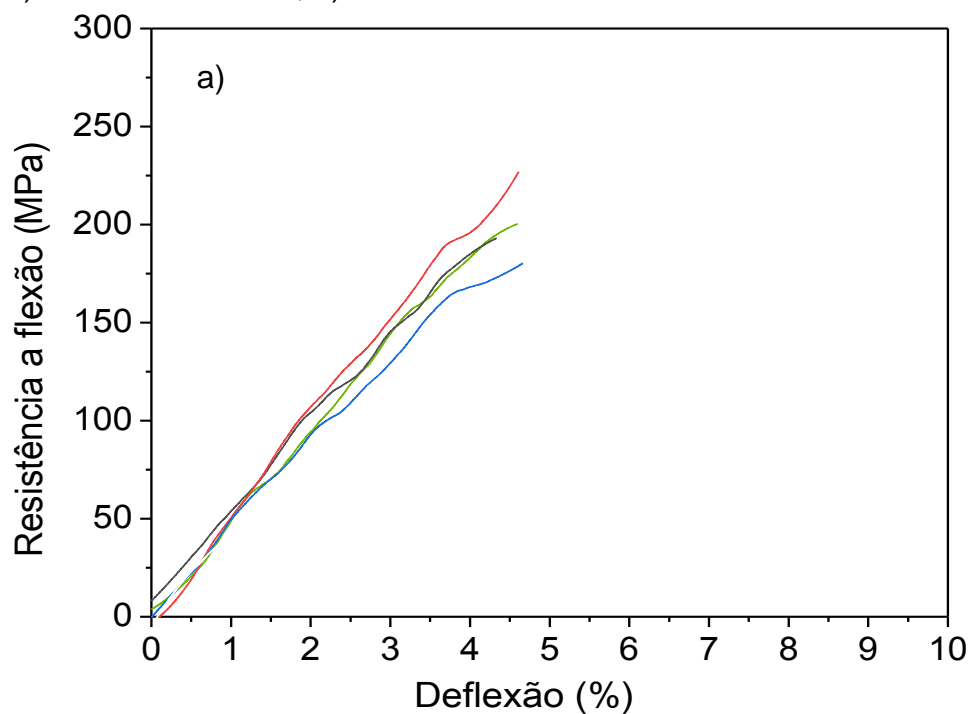
Figura 44 - Ensaio de flexão em três pontos no PRFV no estado original.



Fonte: Autoria própria (2017).

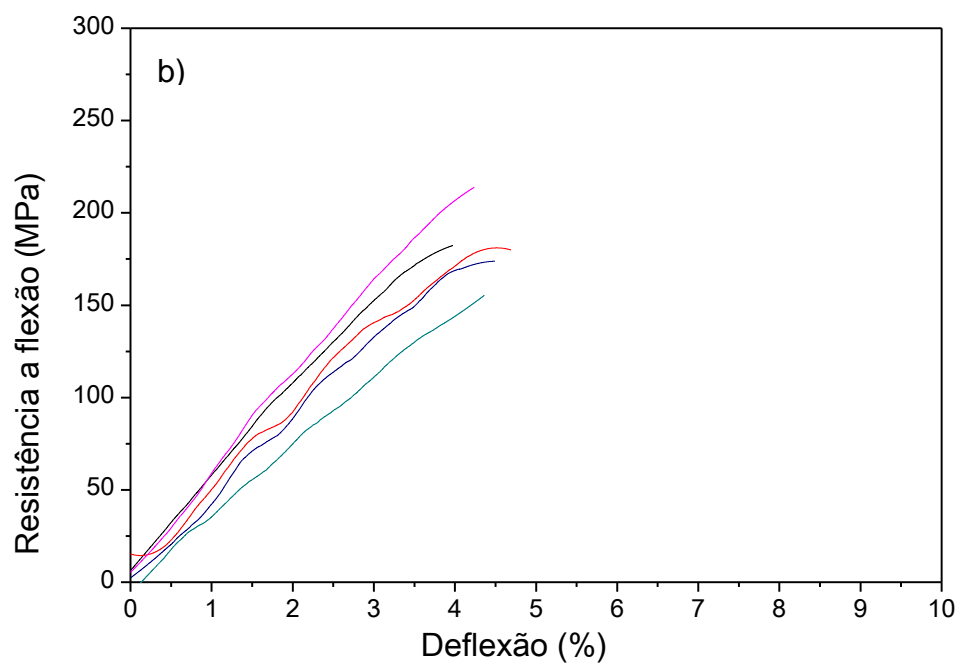
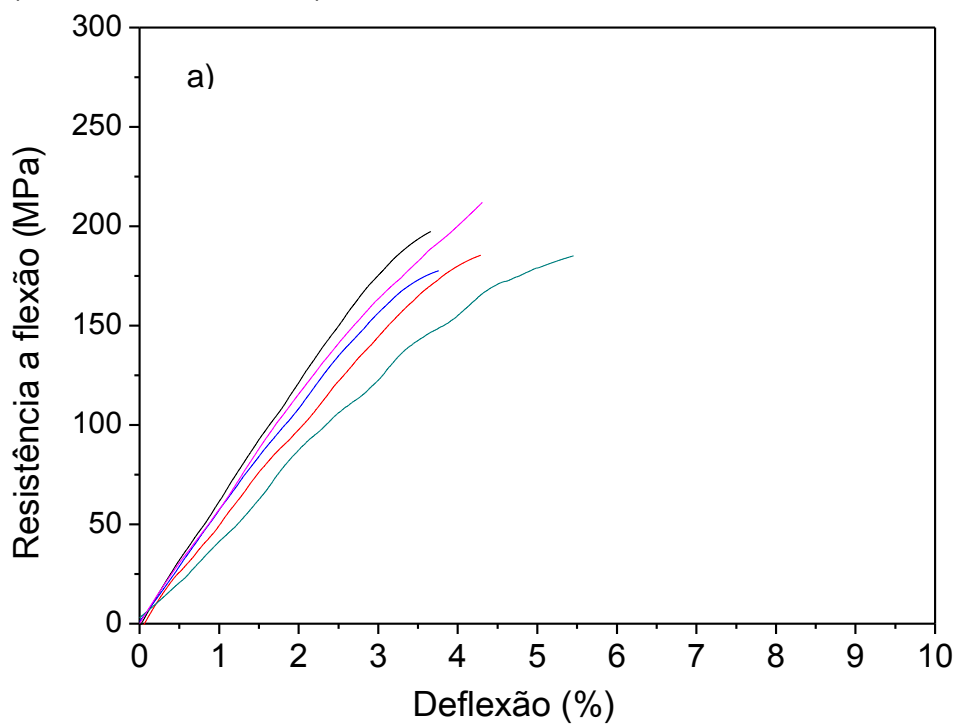


Figura 45 - Ensaio deflexão em três pontos no PRFV envelhecido durante 4 meses  
a) acima do efluente; b) imerso no efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 46 - Ensaio deflexão em três pontos no PRFV envelhecido durante 8 meses  
a) acima no efluente b) imerso ao efluente.



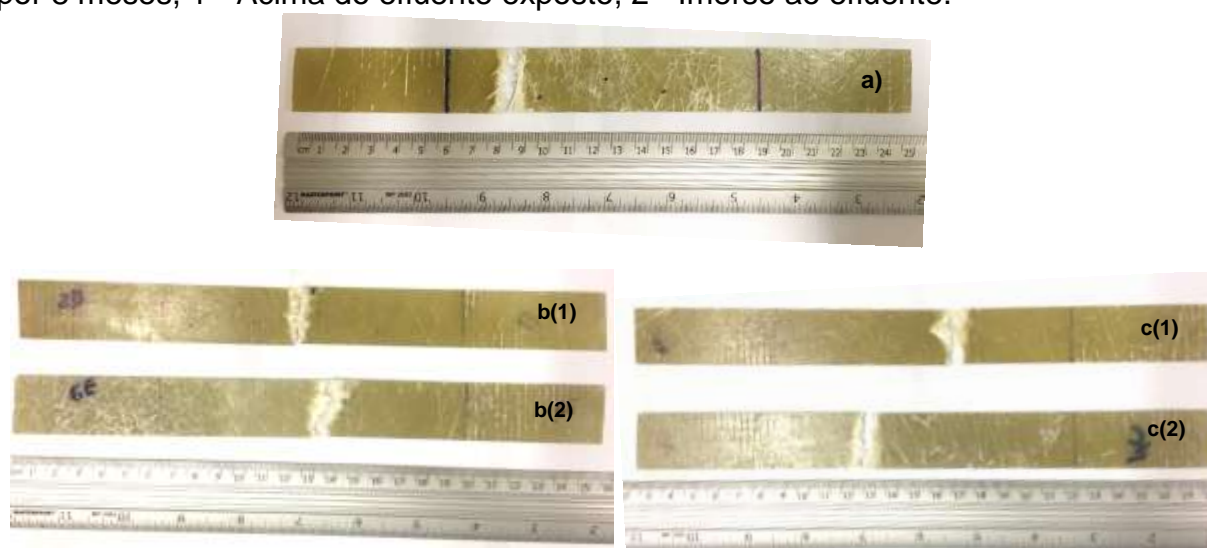
Fonte: Autoria própria (2017).

## 6.2.1 Caracterização da fratura final

### 6.2.1.1 Ensaio de tração Uniaxial

De acordo com a ASTM D3039-14 a fratura do PRFV estudado pode ser classificada como *Lateral gage middle* – LGM, que se refere a uma fratura lateral no meio da área útil do CP, conforme a Figura 47 apresentado abaixo.

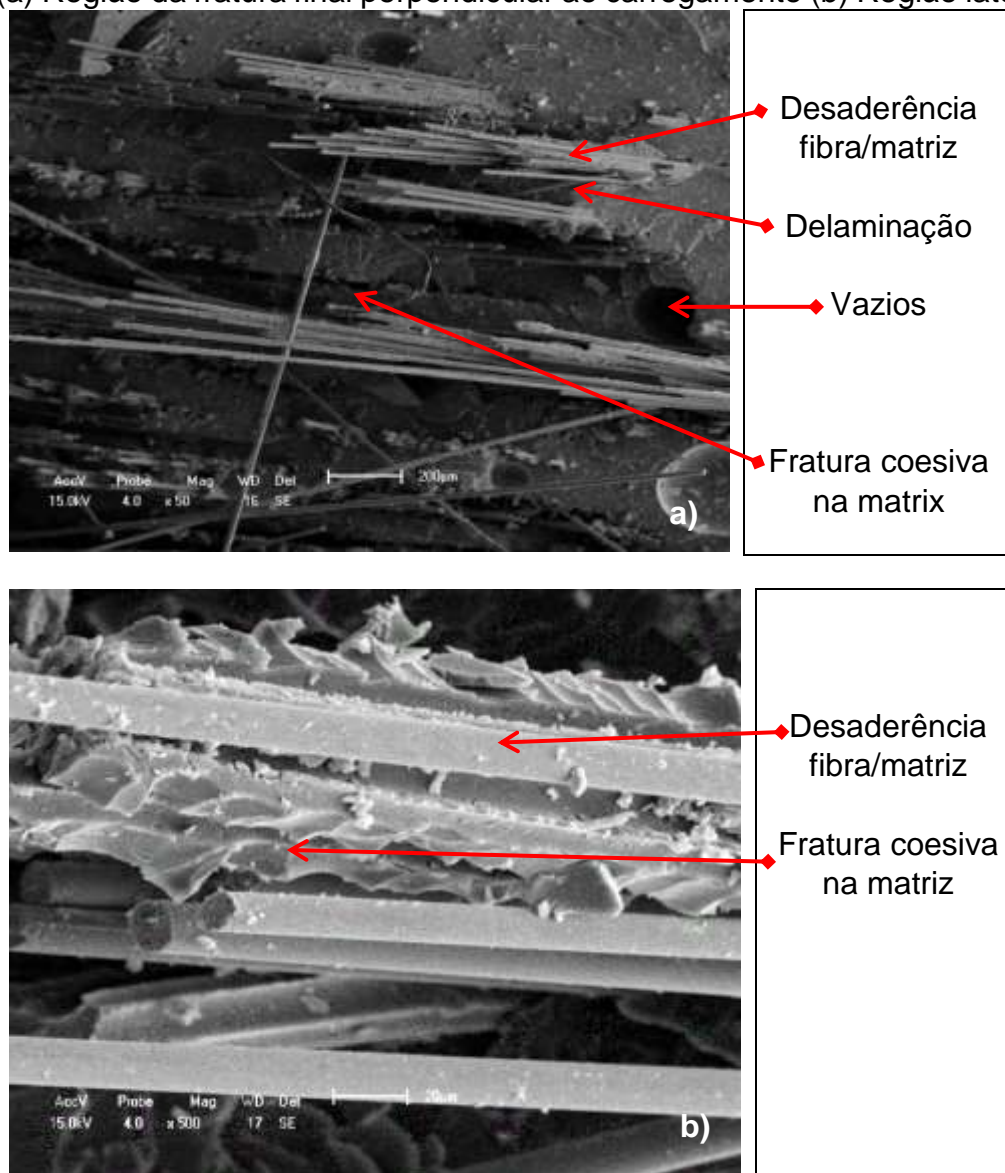
Figura 47 - Fraturas dos PRFV após o ensaio de tração uniaxial, a) Estado original; b) Exposto por 4 meses, 1 - Acima do efluente, 2 - Imerso ao efluente; c) Exposto por 8 meses, 1 - Acima do efluente exposto, 2 - Imerso ao efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na Figura 48 (a) há a presença da desaderência da fibra/matriz e fratura coesiva na matriz, sendo esta evidenciada pela fissura. Além disso, é também evidenciado o processo de delaminação entre as camadas internas do compósito e a presença de vazios, sendo estes ocasionados provavelmente pelo processo de fabricação. Na Figura 48 (b) é possível evidenciar a presença de fratura coesiva na matriz além da desaderência fibra/matriz.

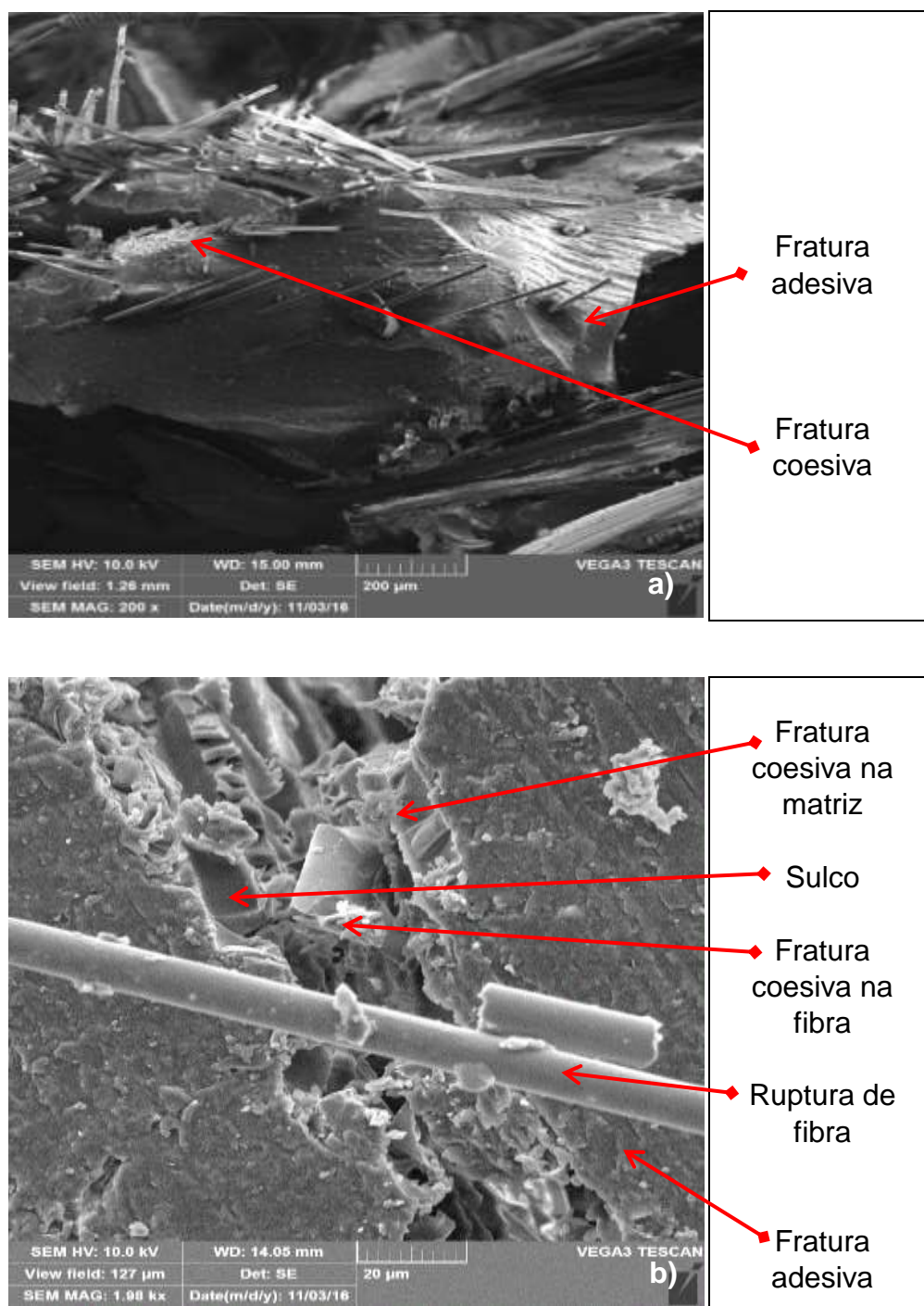
Figura 48 – Característica da fratura final do CP original - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na Figura 49 (a) observa-se a presença da desaderência fibra/matriz e a fratura coesiva na matriz e na Figura 49 (b) se detecta a fratura coesiva na matriz, a presença de sulco, ocasionado exatamente pelo o arranque de fibras, além da fratura coesiva e adesiva nas fibras.

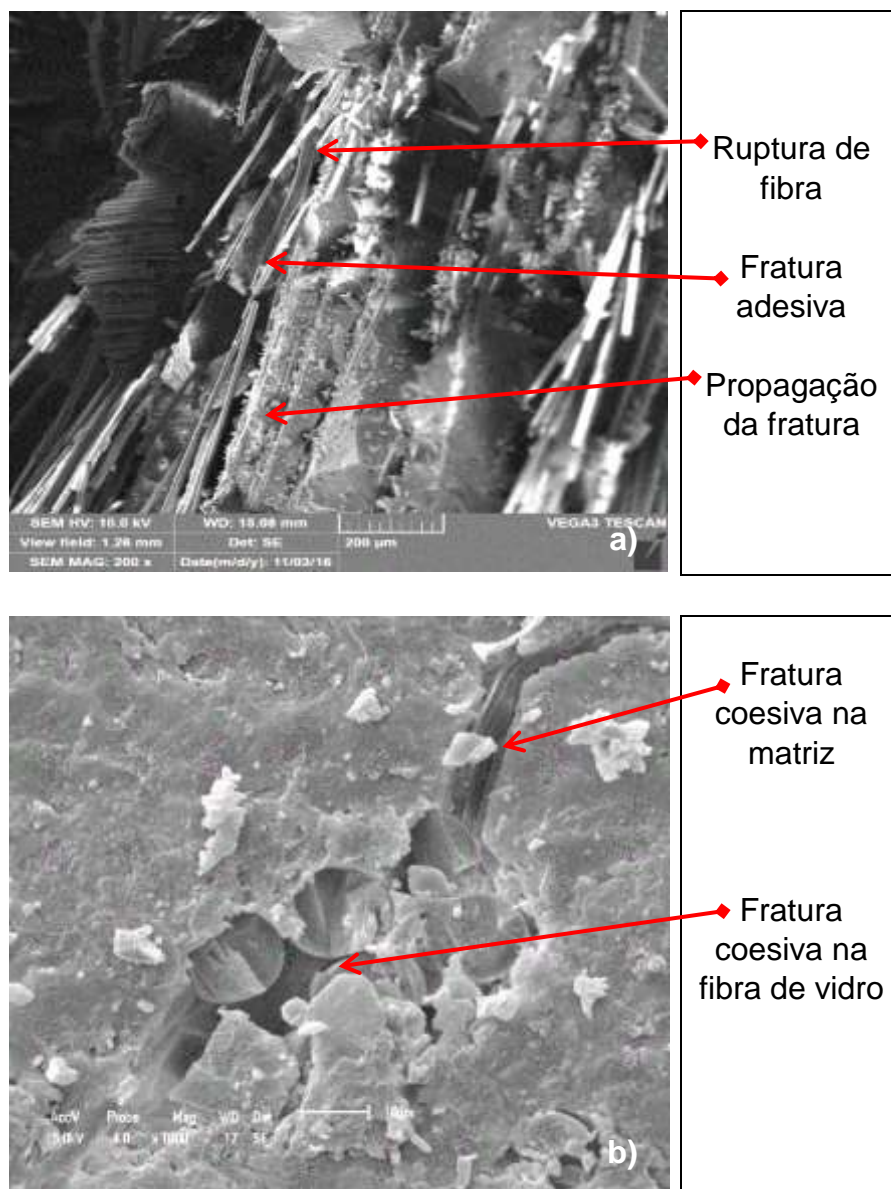
Figura 49 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 4 meses - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na região da fratura final, Figura 50 (a), é possível verificar a fratura coesiva na matriz na direção do carregamento e fratura adesiva e ruptura de fibras. Na região lateral da fratura final, verifica-se fratura na matriz e na fibra do tipo coesiva, Figura 50 (b).

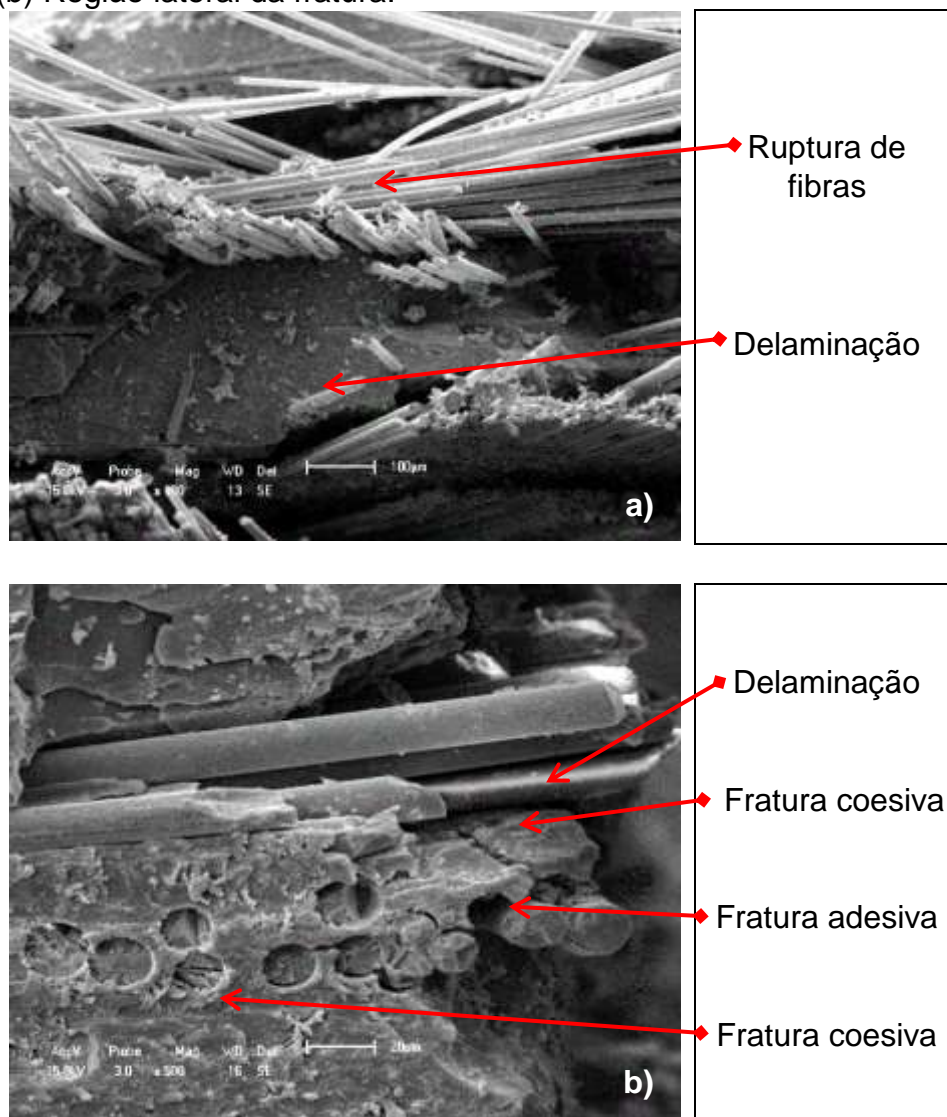
Figura 50 - Característica da fratura final do CP imerso no efluente após 4 meses - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na região da fratura final, Figura 51 (a) tem a presença de ruptura de fibras e delaminação entre as camadas, além da fratura coesiva na matriz. Na lateral do CP, Figura 51 (b) constata-se fraturas do tipo adesiva na interface fibra/matriz, coesivas na matriz e na fibra. A fratura adesiva acontece devido à região da interface da fibra/matriz ter baixa adesividade, neste caso, essa fratura provoca fissura também na matriz. Ainda é possível observar a delaminação entre as camadas de reforço. Ao analisar a região da fratura verificasse delaminação acentuada, com a separação entre as fibras e a matriz e também a ruptura das fibras de vidro.

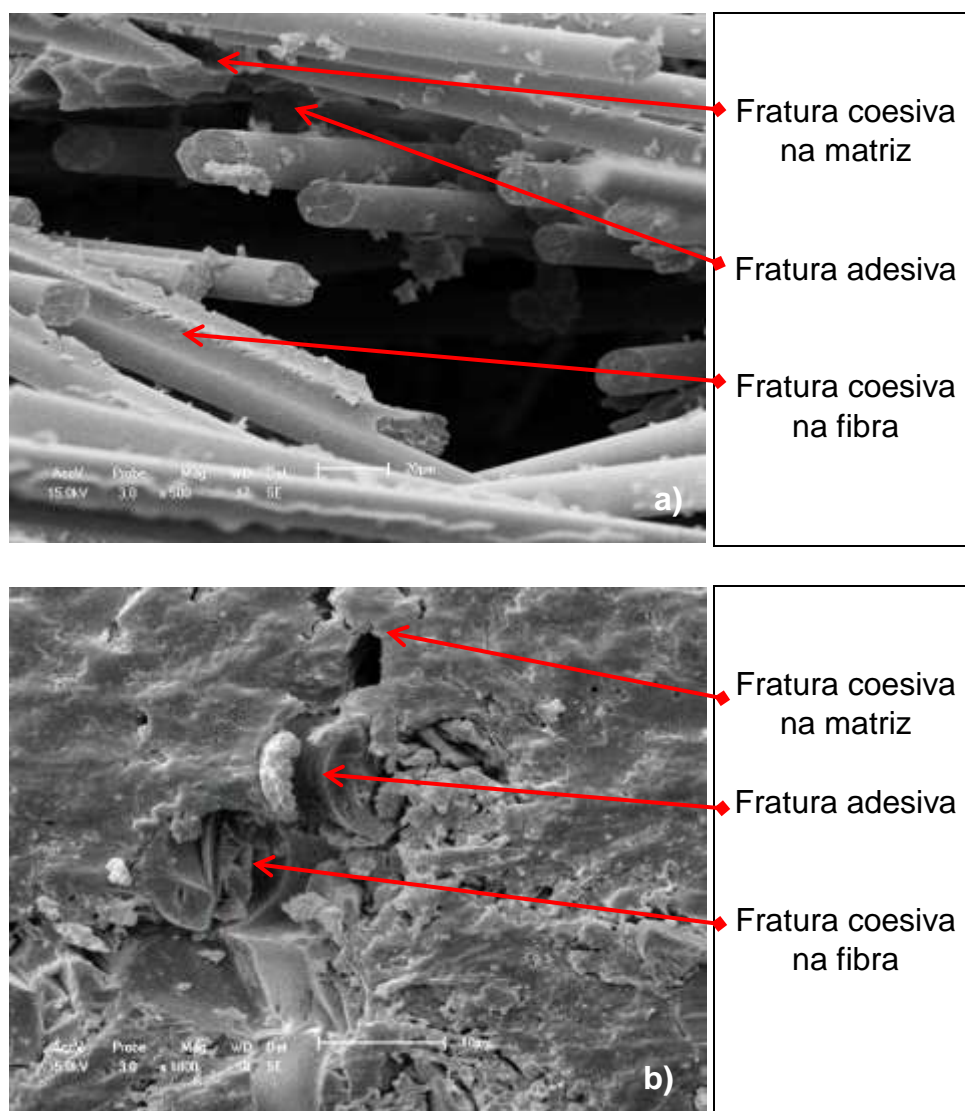
Figura 51 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 8 meses - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na região da fratura final, Figura 52 (a), há a presença da fratura do tipo coesiva na fibra e na matriz além da fratura adesiva na interface fibra/matriz. Na Figura 52 (b) observa-se também, a fratura coesiva tanto na matriz como no reforço; e ainda a falta de aderência fibra/matriz provocando assim a fratura adesiva na região da respectiva interface.

Figura 52 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 8 meses - Ensaio de tração uniaxial. (a) Região da fratura final perpendicular ao carregamento (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

No Quadro 4 têm-se uma síntese dos danos encontrados nos compósitos poliméricos estudados em cada condição de exposição ao final do ensaio de tração uniaxial. Verifica-se que em praticamente todos os CP houve rupturas nas fibras de vidro e fratura do tipo coesiva do reforço. Nos CP expostos durante oito meses ocorreram fraturas do tipo adesiva na matriz, devido à desaderência entre as fibras e a matriz, tal comportamento também foi observado nos trabalhos de Tino (2014) e Felipe (2017).



Quadro 4 - Mecanismos de danos encontrados nos PRFV após o ensaio de tração uniaxial.

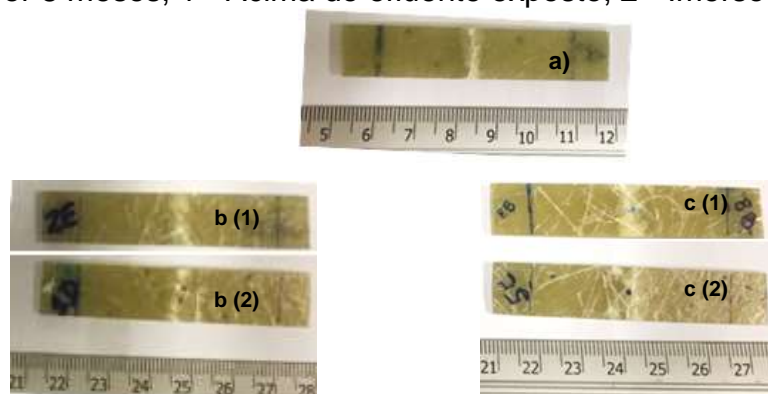
<b>Compósito</b>	<b>Mecanismos de danos</b>
PRFV no estado original	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desaderência fibra/matriz</li> <li>• Delaminação</li> <li>• Vazios</li> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> </ul>
PRFV após 4 meses de exposição acima ao efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fratura adesiva na matriz</li> <li>• Sulcos</li> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> <li>• Fratura coesiva na fibra de vidro</li> <li>• Ruptura de fibras</li> </ul>
PRFV após 4 meses de exposição imerso no efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fratura adesiva na matriz</li> <li>• Propagação da fratura</li> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> <li>• Fratura coesiva na fibra de vidro</li> </ul>
PRFV após 8 meses de exposição acima ao efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fratura adesiva na matriz</li> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> <li>• Ruptura de fibras</li> <li>• Delaminação</li> </ul>
PRFV após 8 meses de exposição imerso no efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> <li>• Fratura coesiva na fibra de vidro</li> <li>• Fratura adesiva na matriz</li> <li>• Fratura adesiva na fibra de vidro</li> </ul>

Fonte: Autoria própria (2017).

#### 6.2.1.2 Ensaio de flexão em três pontos

A análise da fratura foi realizada após o ensaio de flexão em três pontos, na Figura 53 verifica-se que não houve o rompimento completo do corpo de prova após a fratura final e que essa se deu de forma concentrada na região tracionada.

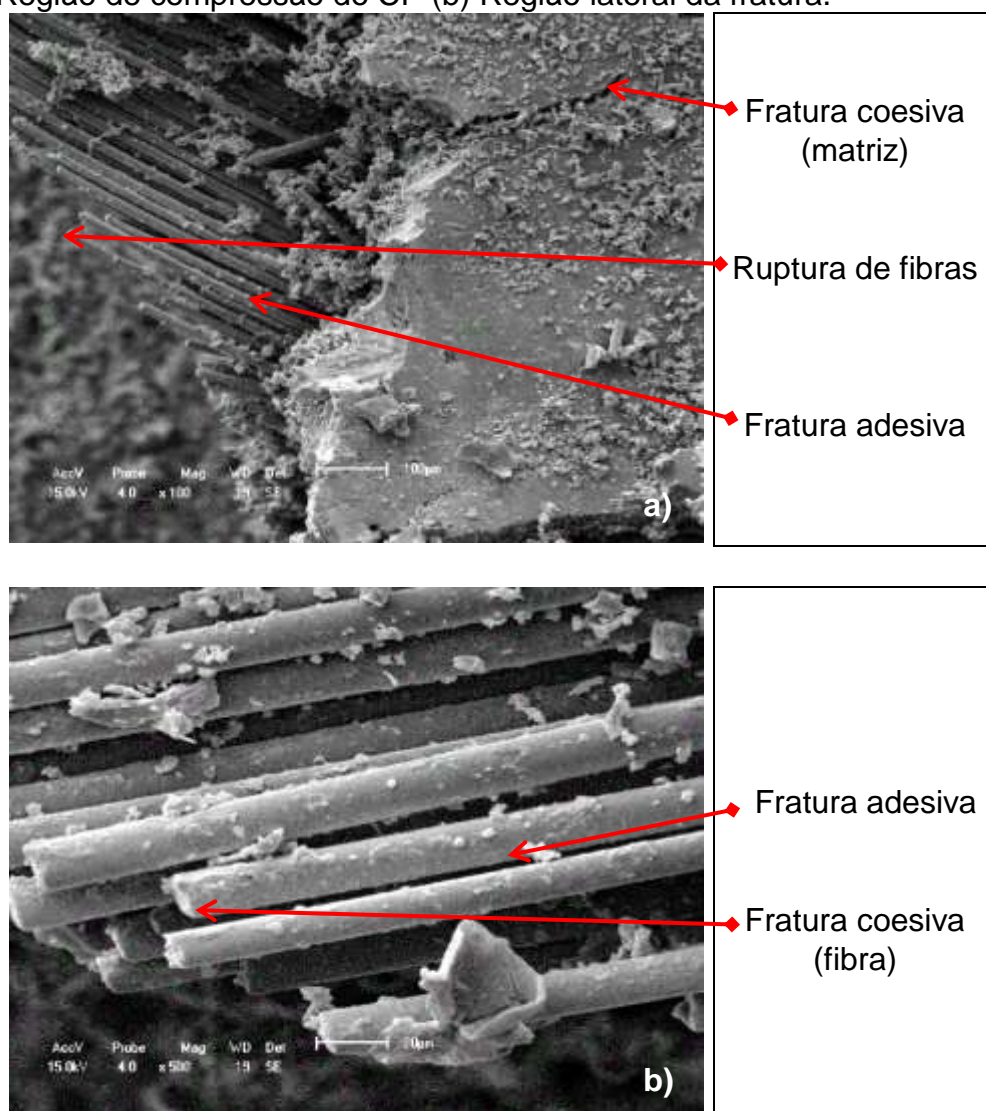
Figura 53 - Fraturas dos PRFV após o ensaio de flexão em três pontos a) Estado original; b) Exposto por 4 meses, 1 - Acima do efluente, 2 - Imerso ao efluente; c) Exposto por 8 meses, 1 - Acima do efluente exposto, 2 - Imerso ao efluente.



Fonte: Autoria própria (2017).

As figuras 54, 55, 56, 57 e 58 são referentes as imagens dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão em três pontos. Na condição original, Figura 54 (a) na região da lateral da fratura do compósito, apresentou fratura do tipo coesiva na matriz, bem como, rupturas de fibras e fratura adesiva na interface. Além disso, na Figura 54 (b) observa-se também fratura coesiva na matriz.

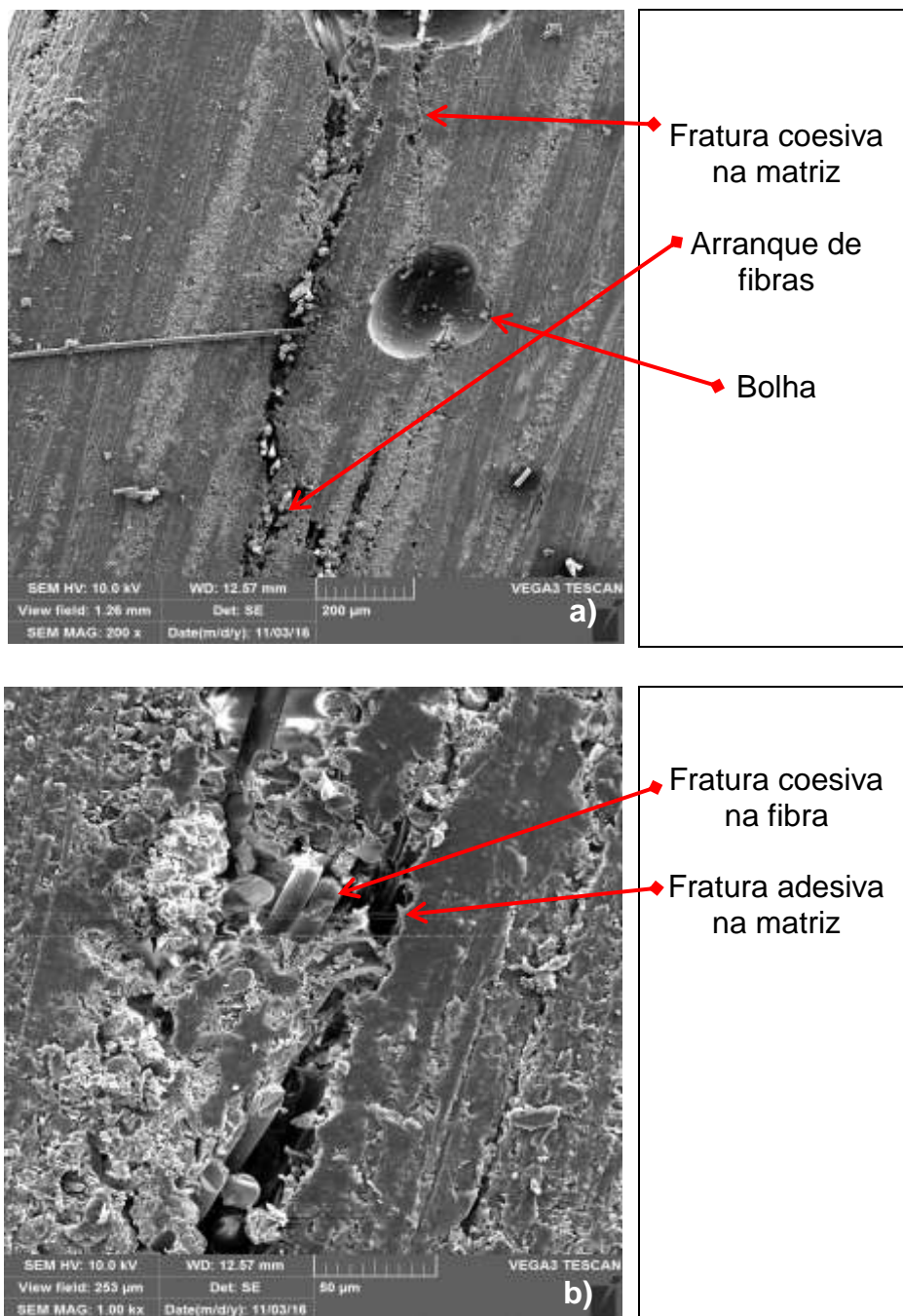
Figura 54 - Característica da fratura final do CP original - Ensaio de flexão. (a) Região de compressão do CP (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Analisando a lateral do compósito envelhecido por 4 meses acima ao efluente, Figura 55, têm-se fraturas do tipo coesiva tanto na matriz como na fibra, observa-se ainda na Figura 55 (a), a presença de bolha provocado provavelmente pelo processo de fabricação e ainda arranque de fibras, evidenciada pela presença de pequenos furos.

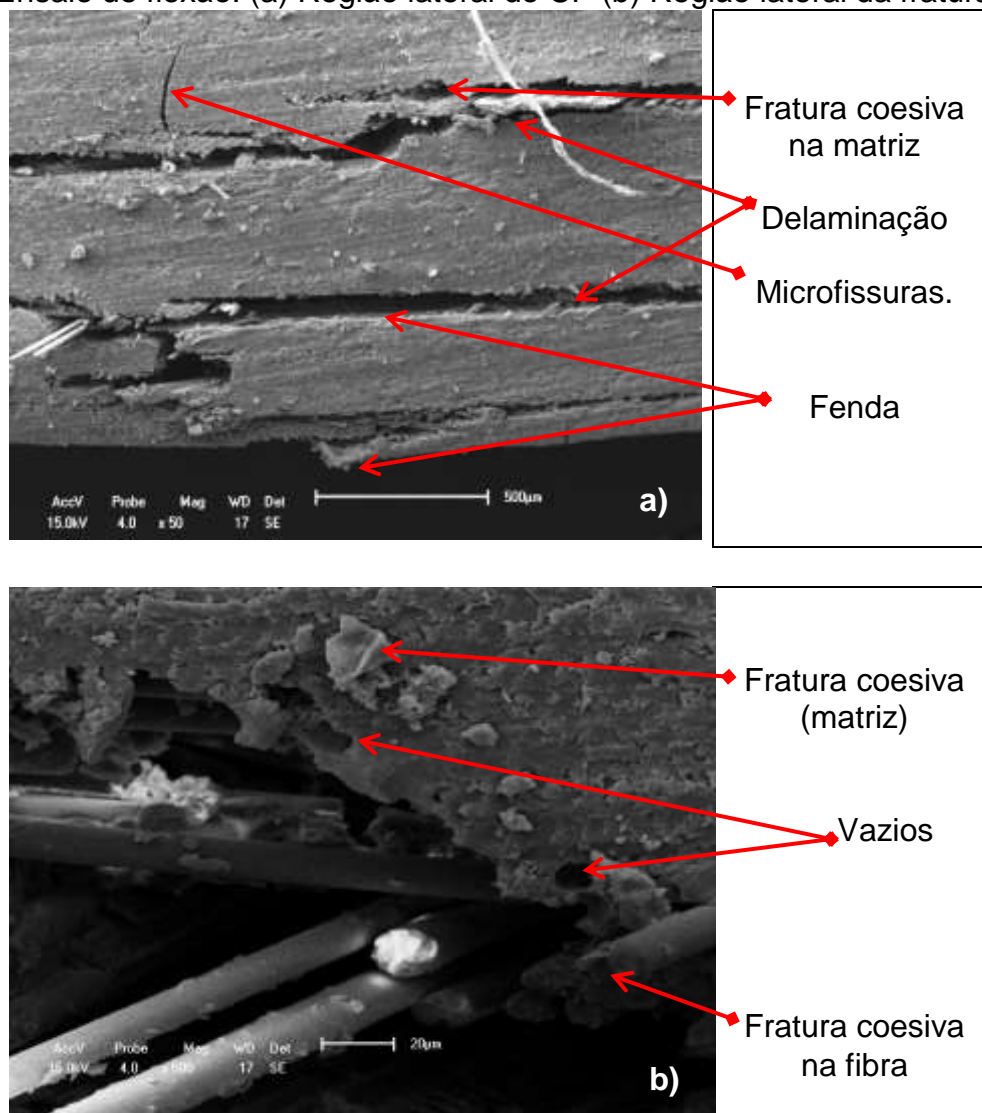
Figura 55 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 4 meses - Ensaio de flexão. (a) Região lateral do CP (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 56, mostra a lateral do compósito envelhecido por 4 meses quando imerso no efluente, é perceptível a visualização da fenda decorrente da propagação do esforço de flexão perpendicularmente ao CP, evidenciando que o mesmo rompeu devido ao respectivo esforço, além de microfissuras e fraturas do tipo coesiva na matriz, e arranque de fibras evidenciado pela presença de vazios, também a ocorrência do processo de delaminação.

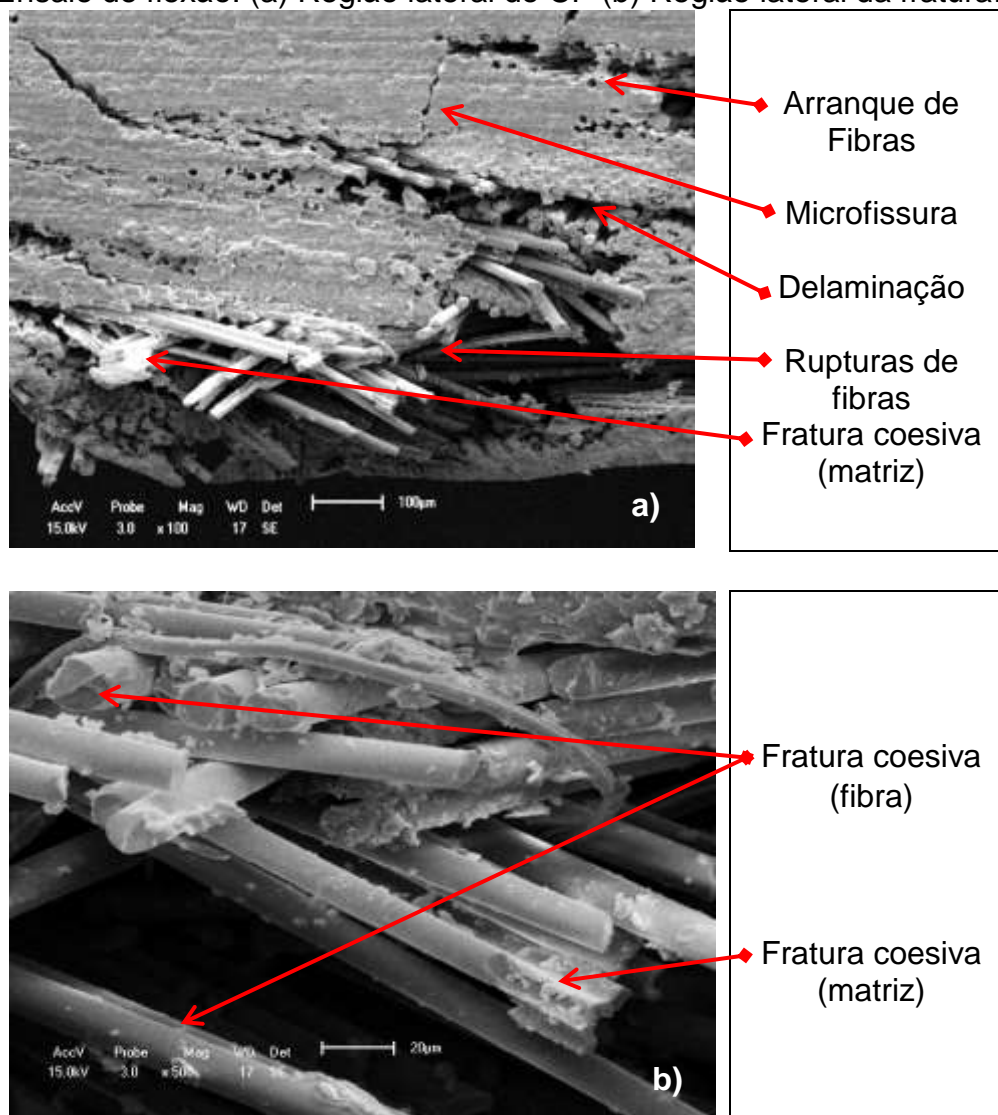
Figura 56 - Característica da fratura final do CP imerso no efluente após 4 meses - Ensaio de flexão. (a) Região lateral do CP (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na lateral do compósito envelhecido durante 8 meses imerso no efluente, Figura 57 (a), é evidenciado fraturas do tipo adesiva na matriz, rupturas e arranque de fibras sendo representando pelos furos e microfissuras próxima a região da fratura, que passa de uma lâmina para outra provocando delaminação entre as camadas. Na Figura 57 (b) observa-se fratura coesiva na matriz e na fibra, além de fratura adesiva na interface fibra/matriz.

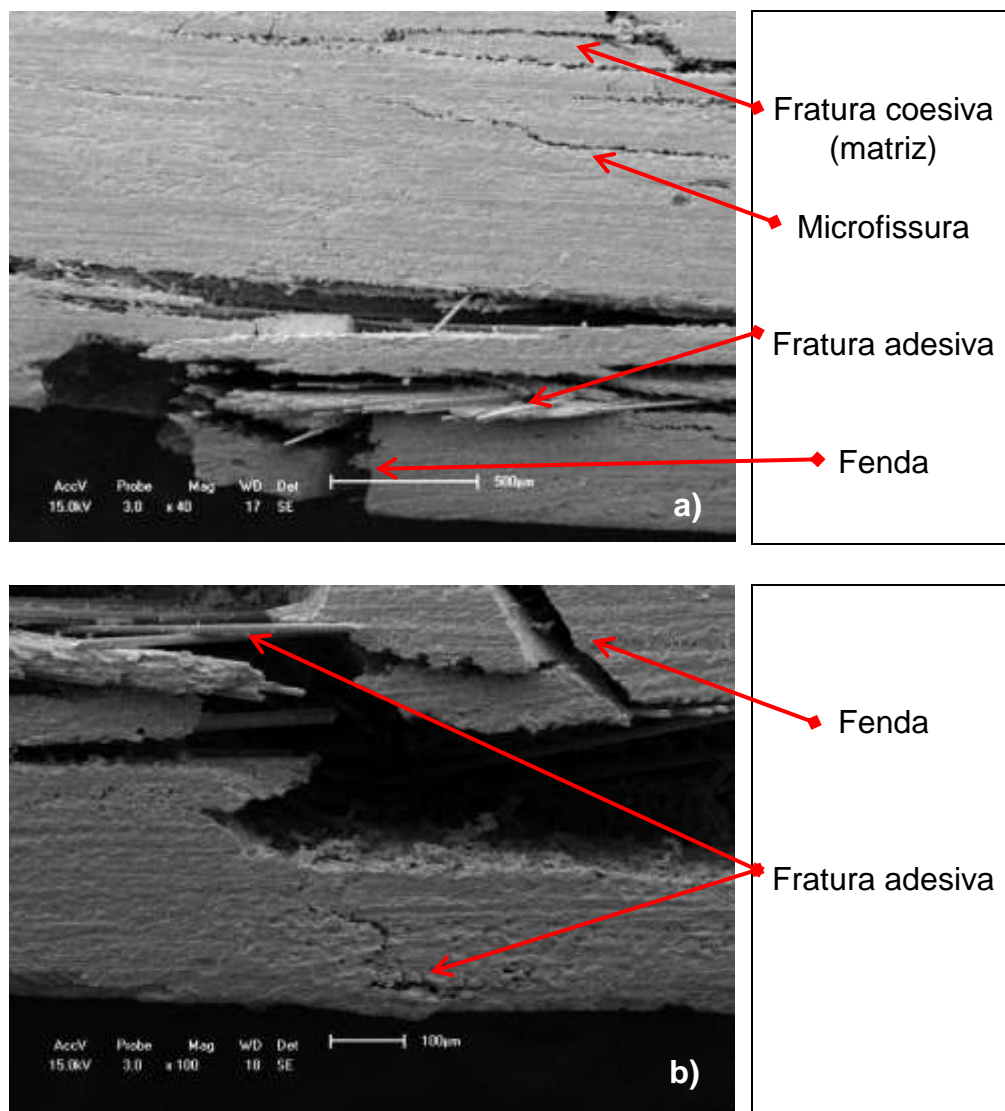
Figura 57 - Característica da fratura final do CP acima do efluente após 8 meses - Ensaio de flexão. (a) Região lateral do CP (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 58 (a) mostra a lateral do compósito envelhecido por 8 meses imerso no efluente, é perceptível a visualização da fenda decorrente do esforço de flexão na região tracionada, microfissuras ao longo da região rica de resina, fratura adesiva na interface fibra/matriz. Além disso, na Figura 58 (b) se observa desaderência fibra/matriz que é ocasionada pela formação e propagação da fenda.

Figura 58 - Característica da fratura final do CP imerso no efluente após 8 meses - Ensaio de flexão. (a) Região lateral do CP (b) Região lateral da fratura.



Fonte: Autoria própria (2017).

Após a avaliação individual dos CP submetidos o ensaio de flexão em três pontos, no Quadro 5 têm-se a compilação dos danos sofridos pelo compósito. Verifica-se que em todos os CP envelhecidos houve fraturas do tipo adesiva na matriz, como no trabalho desenvolvido por Felipe (2012). Os outros danos foram semelhantes aos danos sofrido pelos CP submetidos ao ensaio de tração uniaxial.

Quadro 5 - Mecanismos de danos encontrados nos PRFV após o ensaio de flexão em três pontos.

<b>Compósito</b>	<b>Mecanismo de dano</b>
PRFV no estado original	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> <li>• Ruptura de fibras de vidro</li> <li>• Fratura coesiva na fibra de vidro</li> <li>• Fratura adesiva na matriz</li> </ul>
PRFV após 4 meses de exposição acima ao efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> <li>• Arranque de fibras</li> <li>• Bolha</li> <li>• Fratura adesiva na matriz</li> <li>• Fratura coesiva na fibra de vidro</li> </ul>
PRFV após 4 meses de exposição imerso no efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> <li>• Delaminação</li> <li>• Microfissuras</li> <li>• Fenda</li> <li>• Vazios</li> <li>• Fratura coesiva na fibra de vidro</li> </ul>
PRFV após 8 meses de exposição acima ao efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microfissura</li> <li>• Delaminação</li> <li>• Fratura coesiva na fibra de vidro</li> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> <li>• Ruptura de fibras</li> <li>• Arranque de fibras</li> </ul>
PRFV após 8 meses de exposição imerso no efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fratura adesiva na matriz</li> <li>• Fenda</li> <li>• Microfissura</li> <li>• Fratura coesiva na matriz</li> </ul>

Fonte: Autoria própria (2017).

## 7 CONCLUSÕES

- Não houve significativa alteração na massa do PRFV após o tempo de exposição.
- O envelhecimento ambiental provocou a uma leve degradação na superfície do compósito, sendo evidenciada pela alteração na coloração do PRFV.
- Ao término do período de exposição, foi observado que o limite de resistência à tração permaneceu praticamente constante para a condição de imersão, considerando os desvios padrões, no entanto, houve um aumento da rigidez de 22% e como consequência a diminuição do processo de deformação.



- Referente as propriedades de flexão, a resistência permaneceu praticamente inalterada considerando os respectivos desvios padrões, no entanto, houve uma perda na rigidez de aproximadamente 44%.
- A fratura final do compósito após o ensaio de tração uniaxial foi classificada como *Lateral gage middle* - LGM, conforme a ASTM D3039.
- Os principais danos detectados no PRFV após os ensaios de tração uniaxial e flexão em três pontos tanto para CP original e como para os envelhecidos foram: ruptura e arranque de fibras, fratura coesiva na matriz e na fibra e delaminação.
- A fratura final do compósito após o ensaio de flexão em três pontos foi bastante concentrada na região tracionada.
- Deste modo, ao término do período de exposição pode-se concluir que o compósito polimérico reforçado por fibras de vidro (PRFV), tanto a resistência à tração, como à flexão permaneceram praticamente constantes, variando apenas a rigidez para ambos os ensaios mecânicos. Logo, é possível concluir que esse material, para essas condições de serviço, e para o tempo de exposição analisado, apresenta-se como uma alternativa a ser utilizada para a fabricação de ETE. No entanto, outras resinas podem ser testadas para uma maior confiabilidade e também tempos maiores de exposição devem ser avaliados.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Aumentar o tempo de exposição do PRFV no efluente.
- Variar o tipo de resina.
- Variar a configuração do material de reforço.
- Variar a configuração do laminado.
- Analisar quimicamente a interface fibra/matriz.
- Alterar o local de exposição do PRFV na ETE.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R**: Guide for The Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. USA: ACI COMMITTEE 400, 2002.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods**: for the examination of water and wastewater. 22. ed. Washington: APHA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039-14**: standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. USA: ASTM, 2014.

\_\_\_\_\_. **ASTM D3171-15**: standard test methods for constituent content of composite materials. USA: ASTM, 2015.

\_\_\_\_\_. **ASTM D3878-15**: standard Terminology for Composite Materials. USA: ASTM, 2015.

\_\_\_\_\_. **ASTM D790-10**: standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. USA: ASTM, 2010.

\_\_\_\_\_. **ASTM D792-13**: standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement. USA: ASTM, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 12.209**. Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

BRASIL. Decreto-lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm)>. Acesso em: 03 mar. 2016.

\_\_\_\_\_. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução no 430, de 2011**. Brasília, DF, p. 89, maio. 2011.

BRUNELLI, Deborah Dibbern. **Materiais compósitos poliméricos**. Disponível em: <<http://evfita.ita.br/evfita2012/apresentacoes/Deborah.pdf>>. Acesso em: 20 de out. 2016.

CALEGARI, Eliana Paula; OLIVEIRA, Branca Freitas de. Compósitos a partir de materiais de fontes renováveis como alternativa para o desenvolvimento de produtos. **Sustentabilidade em Debate**, v. 7, n. 1, p. 140-155, jan/abr 2016.

CAMPBELL, Flake C. **Structural Composite Materials**. Ohio: ASM International, 2010.

CAMPELLO, Eduardo de Figueiredo. **Comportamento mecânico de argamassas reforçadas por fibras sintéticas e metálicas**. 2013. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos polímeros**: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2.ed. São Paulo: Artlieber, 2006.

CARNEIRO, Luiz Antônio Vieira; TEIXEIRA, Ana Maria Abreu Jorge. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Sociedade**. v. 3, 2008.

CAVALCANTI, Wilma Sales. **Compósitos poliéster/tecidos tramados vegetal vidro**: caracterização mecânica e simulação da sorção de água. 2006. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

DAO, B. et al. Accelerated aging versus realistic aging in aerospace composite materials: I. the chemistry of Thermal Aging in a low-temperature-cure Epoxy composite. **Journal of the applied polymer**. v. 102, n. 5, 2006, p. 4291-4303,

DANTAS, Camilla M.; FELIPE, Renata Carla Tavares; FELIPE, Raimundo Nonato. Avaliação das propriedades de flexão do compósito plástico reforçado com fibra de vidro quando em contato com diferentes fluidos. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros – Foz do Iguaçu, PR – Outubro/2009.

DOGAN, Akar; ATAS, Cesim. Variation of the mechanical properties of E-glass/epoxy composites subjected to hygrothermal aging. **Journal of Composite Materials**. v.0, n.0, p. 1–10, 2015.

EMBRAPOL. Disponível em:  
<[http://www.embrapol.com.br/hot\\_resinas/re\\_moldaveis.html](http://www.embrapol.com.br/hot_resinas/re_moldaveis.html)>. Acesso em: em: 20 de dez. 2016.

FECHINE, Guilhermino J. M. Fotodegradação de compósitos de poliestireno/argila montmorilonita: Efeito do tipo de argila e presença de sal. **Polímeros**. v. 22, n. 1, p. 13-21, 2012.

FELIPE, Raimundo Nonato; FELIPE, Renata Carla Tavares; AQUINO, Eve Maria. Laminar composite structures: Study of environmental aging effects on structural integrity. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. v. 31, n. 21, p. 1455-1466, 2012.

\_\_\_\_\_. **Efeitos da radiação UV, temperatura e vapor aquecido nos compósitos poliméricos**: monitoramento, instabilidade estrutural e fratura. 2012b. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio grande do Norte, 2012b.

FELIPE, Renata Carla Tavares dos Santos. **Envelhecimento ambiental acelerado em PRF a base de tecidos híbridos kevlar/vidro**: propriedades e instabilidade estrutural. 2012a. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio grande do Norte, 2012a.

\_\_\_\_\_. **Moldagem a vácuo de plástico reforçado**: parâmetros de controle e propriedades dos moldados em PRFV. 1997b. 98 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio grande do Norte, 1997b.

\_\_\_\_\_. **Comportamento mecânico e fratura de moldados em PRFV**. 1997a. 100 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio grande do Norte, 1997a.

\_\_\_\_\_. **Materiais compostos**. Natal: IFRN, 2008. (Apostila)

FELIPE, Renata Carla Tavares dos Santos et al. Polymer Composites Reinforced with Hybrid Fiber Fabrics. **Materials Research**. v. 20, n. 2, p. 555-567, 2017.

FERRAZ, Danillo Luiz de Magalhães. **Eficiência de uma ete em escala real composta por reator UASB seguido de lodo ativado**. 2014. 79 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio grande do Norte, 2014.

FORTUNATO, Carlos Maurício. **Agressividade de sulfetos ao concreto de reatores tipo Ralf**. Disponível em: <<http://sanepar.com.br/sanepar/sanare/v16/SULFETOS.htm>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

FUNDAÇÃO DE APOIO À EDUCAÇÃO E AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO RIO GRANDE DO NORTE (FUNCERN). **Estudo de impacto ambiental – eia do sistema de esgotamento sanitário da zona norte e ETE Jaguaribe Natal – Rio Grande do Norte**. Natal: Funcern, 2013.

GLÓRIA, R.M. Estudo dos processos de formação, acumulação, emissão e oxidação de sulfeto de hidrogênio em reatores UASB tratando esgotos domésticos. 2009. 65 f. Dissertação (Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Mestrado), UFMG, Belo Horizonte, 2009.

HOLLER, F. James; SKOOG, Douglas A.; CROUCH, Stanley R. **Princípio de análise instrumental**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HULL, D; CLYNE, T. W. **An introduction to composite materials**. 2.ed. Cambridge: University press, 1996.

JOSE, Josmin P. et al. **Advances in Polymer Composites**: Macro- and Microcomposites – State of the Art, New Challenges, and opportunities, 2012.

KABLOV et al. Climatic Aging of Composite Aviation Materials: III. Significant Aging Factors. **Russian Metallurgy (Metally)**. vol. 2012, n. 4, p. 323–329, 2012.

LEÃO, MA; TINO, SRL; AQUINO, Eve Maria. Accelerated environmental aging effects in structural integrity of licuri fiber reinforced plastic. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. v. 34,n. 5, p. 351-363, 2015.

MANCUSO, Pedro Caetano Sanches; SANTOS, Hilton Felício dos (Ed.). **Reúso de água**. São Paulo: Manole, 2003.

MARINUCCI, Gerson. **Desenvolvimento e inovação em materiais compósitos poliméricos**. São Paulo: LANXESS Tech Series IPEN/USP, 2012.

\_\_\_\_\_. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia**. São Paulo: Artliber, 2011.

MENDONÇA, Paulo. Tarso. R. **Materiais Compostos & Estruturas-Sanduíches**. Barueri, SP: Manole, 2005.

MIKHAILOVA, Irina. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática. **Revista Economia e desenvolvimento**, n.16, 2004.

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Orientações básicas para operação de Estações de tratamento de esgoto – ETE**. Belo Horizonte: FEAM, 2006.

MOTA, Francisco Suetônio Bastos; SPERLING, Marcos von (Coord.). **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

MOUALLIF, Ilias. Degradation of dynamic mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composite pipes after immersion in various temperatures. **Journal of Composite Materials**. v. 48, n. 24, p. 3025–3034, 2014.

NASCIMENTO, Elimar Pinheiro do. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. **Estudos avançados**. v. 74, n. 26, 2012.

NICHOLAS, J. et al. Effects of accelerated environmental aging on glass fiber reinforced thermoset polyurethane composite. **Composites part B: engineering**. v. 94, 2016, p. 370-378.

OLIVEIRA, Branca Freitas de. **Um modelo analítico e computacional para consideração de efeitos de envelhecimento em estruturas de material compósito**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.179 f. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2004.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Our Common Future: Towards sustainable development**. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/ocf-02.htm>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

PAOLI, M. DE. DEGRADAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE POLÍMEROS. 2º versão online. ed. chemkeys, 2008.

PARDINI, Claudio Luiz; LEVY NETO, Flaminio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologias**. São Paulo; Edgard Blücher, 2006.

PICANÇO, Marcelo de Souza. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá**. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PIVELI, Roque Passos. Características químicas das águas: pH, acidez, alcalinidade e dureza. Disponível em: <[www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id\\_arq=732](http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=732)>. Acesso em: 20 mar. 2017.

REIS, Lineu Belico dos; FADIGAS, Eliane A. Amaral; CARVALHO, Cláudio Elias. **Energia, recursos Naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Manole, 2005.

REZENDE, Mirabel C. Fractografia de Compósitos Estruturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 3, 2007.

RHEINHEIMER, Bianca; KHOE, Sarah Shima. **Ataque por sulfatos em estações de tratamento de efluentes**. 2013. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2013.

RIO GRANDE DO NORTE. Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte - CAERN. **ETE do Baldo - Natal/RN**. Disponível em: <<http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/caern/DOC/DOC000000000017758.PDF>>. Acesso em: 01 jun. 2016.

RODA, Daniel Tietz. **Tudo sobre Plásticos**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm)>. Acesso em: 01 fev. 2016.

SANTOS, Silva. **A deterioração das estruturas**. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/277/679/pt-br/a-deteriora%C3%A7%C3%A3o-das-estruturas.html>>. Acesso em: 01 jun. 2016.

SEYER, Metin. The effect of temperature on hybrid composite laminates under impact loading. **Composites: Part B**. v. 43, p. 2152–2160, 2012.

SHIN, Kwang-Bok; KIM, Chun-Gon; HONG, Chang-Sun. Correlation of Accelerated Aging Test to Natural Aging Test on Graphite–Epoxy Composite Materials. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. n. 22, p. 849-861, 2003.

SILVA, Emilene Rita Pimentel da. **Formulação e caracterização de um nanocompósito polimérico eco-amigável**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e ciência dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2012.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2005.

STARTSEV, Oleg; KROTOV, Anatolii; MASHINSKAYA, Galina. Climatic Aging of Organic Fiber Reinforced Plastics: Water Effect. **J. Polym. Mater.** v. 37, p. 161–171, 1997.

SUN, Xiaoyan et al. A novel and simple treatment for control of sulfide induced sewer concrete corrosion using free nitrous acid. **Water research.** n.70, p. 279-287, 2015.

TECHOMPOSITE. Disponível em: <http://techcomposites.com.br/>. Acesso e, 19 de out. 2016.

TELLES, Dirceu D'alkmin; COSTA, Regina Pacca (Coord.). **Reuso da água: conceitos, teorias e práticas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

TINÔ, Sergio Renan Lopes. **Laminados compósitos de PRFV: Efeito da descontinuidade geométrica e do envelhecimento ambiental acelerado**. 2014. 260 f. dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio grande do Norte, 2014.

VICTORINO, Célia Jurema Aito. **Planeta água morrendo de sede: uma visão analítica na metodologia do uso e abuso dos recursos hídricos**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.



## ANEXO A – SUBMISSÃO DO ARTIGO NA REVISTA ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

← → Arquivar Mover Apagar Spam Mais

↑ ↓ ×

• [ESA] Agradecimento pela Submissão Viagem ★

---

• **Equipe Editorial** <noreply.ojs@scielo.org> Jun 5 em 10:34 AM ★  
 Para: Sra Yldenev Silva Domingos

Prezado(a) Sra Yldenev Silva Domingos,

Acusamos o recebimento da submissão do seu manuscrito "ENVELHECIMENTO AMBIENTAL EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS: REVIEW" para Engenharia Sanitária e Ambiental.

O sistema de avaliação é double blind review, onde não revela o nome do autor para o avaliador nem o nome do avaliador para o autor, adotado pelo Conselho Editorial para garantir a avaliação independente realizada por consultores ad hoc.

Os números anteriores da revista podem ser acessados pelo site:  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_serial&pid=1413-4152&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_serial&pid=1413-4152&lng=pt&nrm=iso)

Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:  
<http://submission.scielo.br/index.php/esa/author/submission/181000>  
 Login: yldenev

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este e-mail. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Equipe Editorial  
 Engenharia Sanitária e Ambiental

Equipe Editorial  
 Engenharia Sanitária e Ambiental

---

Engenharia Sanitária e Ambiental  
<http://submission.scielo.br/index.php/esa>

← Responder   ← Responder a todos   → Encaminhar   ... Mais