



Cristiane Araujo dos Santos Silva

**Resíduo de Garrafão de Água Inserido  
em Pavimento de Concreto como Agente  
de Reforço da Matriz**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza  
Picanço

Belém  
2019

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**Cristiane Araujo dos Santos Silva**

**Resíduo de Garrafão de Água Inserido em Pavimento de  
Concreto como Agente de Reforço da Matriz**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço

Belém  
Janeiro de 2019



**RESÍDUO DE GARRAFÃO DE ÁGUA INSERIDO EM  
PAVIMENTO DE CONCRETO COMO AGENTE DE  
REFORÇO DE MATRIZ**

AUTORA:

**CRISTIANE ARAUJO DOS SANTOS SILVA**

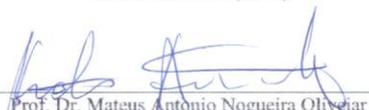
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA  
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 25 / 01 / 2019.

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Orientador (UFPA)

  
Prof. Dr. Ricardo José Carvalho Silva  
Membro Externo (UVA)

  
Prof. Dr. Mateus Antonio Nogueira Oliveira  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Biblioteca do ITEC/UFPA-Belém-PA**

---

S586 Silva, Cristiane Araujo dos Santos, 1990  
Resíduo de garrafão de água inserido em  
pavimento de concreto como agente de reforço de  
matriz / Cristiane Araújo dos Santos Silva. - 2018.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal  
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2018.

1.Concreto reforçado com fibra. 2.Sucata de  
plástico - propriedades mecânicas. 3.Resíduos  
como material de construção. 4.Reaproveitamento  
(sobra, refugos, etc.) I.Título.

CDD 23. ed. – 6 2 4 . 1 8 3 4 1

---

Elaborado por Kelren Cecília dos Santos Lima da Mota – CRB-2/1461

A Deus e minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que me guia e está comigo sempre em todos os momentos da minha vida.

Aos professores do PPGEC da UFPA, que me proporcionaram os conhecimentos utilizados como base para a produção do trabalho. Aos professores Marcelo, Jefferson e Mateus que aceitaram me orientar e auxiliar, tornando possível a realização da pesquisa e obtenção do título de mestre.

A PLAMAX, pelo fornecimento do resíduo de garrafão de água utilizado na pesquisa.

Aos laboratórios parceiros da UFPA, nos quais foram realizados ensaios essenciais à pesquisa: Laboratório de mecânica, em especial à professora Carmem, Laboratório de geociências, em especial ao professor Lamarão e Gisele, Laboratório de Engenharia Sanitária. Ao laboratorista Joel. Ao Pesquisador Bartosz e Yasmim Gabriela da NUMATS/UFRJ.

Aos meus pais, Gracinete e Marco, que são os melhores pais que uma filha poderia ter e que sempre dando o melhor de si, me guiaram e me incentivaram a andar em caminhos seguros. Ao meu esposo, Malaquias, sou grata pelo amor e compreensão que sempre me proporcionou. Ao meu filho, Lucas, que apesar de pequenino me ensina a cada dia ser uma pessoa melhor. A minha irmã, Ediane, que mesmo sem muitas palavras ditas, sei que está ao meu lado e principalmente ao lado de seu amado afilhado. Amo todos vocês!

Ao meu amigo, Sabino, que sempre esteve dispostos a ajudar quando precisei e me fez conhecer a verdadeira amizade. Aos meus amigos do CONSORCIO BRT que apoiaram e ajudaram execução de minha pesquisa: Ewerton Bueno, Cláudio Soares, Alan Farias, Luiz Carlos, Felipe Lopes, Brandon Barata, Mateus Menezes e Andresson Silva. Aos meus amigos da CONCRETTEST, querido Mestre Prof. Zacarias, Leandro, João e Bené.

Muito obrigada!

## RESUMO

SILVA, C.A.S. **Resíduo de Garrafão de Água Inserido em Pavimento de Concreto como Agente de Reforço da Matriz**. 2018. 87p Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

Diante da situação problemática presenciada pela população mundial decorrente da falta de práticas de reciclagem, a poluição urbana vem crescendo consideravelmente. A reciclagem precisa estar mais presente no cotidiano das pessoas e das indústrias para que o meio ambiente “respire” de forma mais saudável. Pretendendo coadjuvar com o tema, buscou-se avaliar a reutilização do rejeito de garrafão de água (GA) de polipropileno como fibras com o intuito de contribuir para reforço de concreto em pavimento. O estudo pelo resíduo em questão, se deu através de uma visita a uma fábrica de reciclagem do Município de Ananindeua/PA, onde verificou-se um volume considerável de garrações de água mineral estocados, não podendo mais voltar ao setor alimentício, uma vez que, encontravam-se com prazo de validade ultrapassado e/ou com avarias. O trabalho resume-se em avaliar tanto as características físicas, mecânicas e químicas do resíduo quanto as características mecânicas do concreto reforçado com a fibra de GA (compressão simples, tração por compressão diametral, tração na flexão, análise de tenacidade e módulo de elasticidade), conforme normas vigentes para as idades de 28, 56 e 84 dias. De acordo com os resultados preliminares dos materiais, foram elaborados concretos com adições de 0%, 0,5%, 1,0% e 2,0% de resíduo de garrafão de água e outro para efeito comparativo com a inserção de 0,5% (orientação do fabricante) de microfibras comerciais de polipropileno. Adotou-se como referência um traço de concreto (c:a:b:a/c - 1:2,36:3,33:0,42) utilizado para pavimentação rígida destinado à tráfego pesado em Belém/PA com  $f_{ct,k} = 4,50\text{MPa}$ . De forma geral os resultados apresentados nesta pesquisa, mostram que o concreto reforçado com fibra residual de GA teve um bom desempenho, porém ainda não suficiente para uma utilização direta. Dessa forma, a utilização do material de GA como reforço de matriz cimentícia requer uma atenção especial, uma vez que, para se tornar um produto comercialmente aplicado em larga escala, o mesmo ainda necessita de maior desenvolvimento técnico/científico.

**Palavras-chave:** Resíduo. Fibra. Garrafão de água. Concreto reforçado com fibra. Plástico. Propriedades mecânicas. Reuso.

## ABSTRACT

SILVA, C. A. S. **Water bottle Residue Inserted in Concrete Pavement as Matrix Reinforcing Agent**. 2018. 87p MSc Thesis, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, (in Portuguese).

In the face of the problematic situation witnessed by the world population due to the lack of recycling practices, urban pollution has been growing considerably. Recycling needs to be more present in the daily lives of people and industries so that the environment "breathes" in a healthier way. Intending to assist with the theme, the aim is to evaluate the reuse of the water bottle waste (GA) as fibers with the intention of contributing to concrete reinforcement in pavement. The interest to study the waste in question was through a visit to a recycling plant in the city of Ananindeua/PA, where there was a large amount of bottled mineral water stored and cannot longer return to the food sector, because it's had an expired period of validity. The work consists of evaluating both the physical, mechanical and chemical characteristics of the waste as well as the mechanical characteristics of the composites (axial compression, diametral compression, flexural tensile strength, tensile analysis and modulus of elasticity), according to current standards described in the methodology item, with ages of 28, 56 and 84 days. According to preliminary characterizations of the materials, concrete with 0%, 0,5%, 1,0% and 2,0% with water bottle residue addition was elaborated and another one for comparative effect with addition of 0,5 % of commercial polypropylene microfibers. A concrete composition (c: a: b: a / c-1: 2,36: 3,33: 0,42) was used as reference for rigid paving for heavy traffic in Belém-PA with  $f_{ct, k} = 4.50\text{MPa}$ . In general, the results presented in this research, shows a performance of the reinforced concrete with compatible GA fiber and / or superior with respect to the concrete with addition of commercial microfiber, but the residue of GA to become a commercial product still needs a beneficiation process.

**Keywords:** Waste. Fiber. Water bottle. Concrete reinforced with fiber. Plastic. Mechanical properties. Reuse.

## Lista de Tabelas

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 1 – Propriedades gerais das principais fibras.	12
Tabela 2 - Comprimento das fibras em relação ao diâmetro máximo do agregado graúdo.	18
Tabela 3 - Tipos, aplicações e simbologias dos plásticos segundo a ABNT NBR13230 – Adaptado.	22
Tabela 4 - Principais resinas consumidas no Brasil – Adaptado.	24
Tabela 5 - Propriedades físicas do cimento.	28
Tabela 6 - Propriedades químicas do cimento.	29
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do cimento.	29
Tabela 8 - Determinação da composição granulométrica – Agregado miúdo.	30
Tabela 9 - Características do agregado miúdo.	30
Tabela 10 - Determinação da composição granulométrica - Agregado graúdo.	31
Tabela 11 - Características do agregado graúdo.	31
Tabela 12 - Propriedades físico – química da sílica ativa.	32
Tabela 13 - Dados técnicos dos aditivos.	33
Tabela 14 - Propriedades físicas da fibra comercial.	34
Tabela 15 - Propriedades mecânicas da fibra comercial.	34
Tabela 16 - Traço e material utilizado para ensaios	43
Tabela 17 - Traço e material utilizado para ensaios.	48
Tabela 18 – Métodos de ensaio para determinação da tenacidade.	52
Tabela 19 – Diâmetro, área da seção transversal e comprimento das fibras de GA.	57
Tabela 20 – Resultados das cargas suportadas no ensaio de resistência à tração da fibra resíduo de GA.	59
Tabela 21 – Módulo de elasticidade da fibra do resíduo de GA.	60
Tabela 22 - Resistência à compressão axial – 28 dias.	62
Tabela 23 – Resistência à compressão axial – 56 dias.	63
Tabela 24 – Resistência à compressão axial – 84 dias.	63
Tabela 25 - Índices de tenacidade dos compósitos sob flexão.	71
Tabela 26 - Módulo de Elasticidade para idades de 28 dias.	73
Tabela 27 - Módulo de Elasticidade para idades de 56 dias.	73
Tabela 28 - Módulo de Elasticidade para idades de 84 dias.	74
Tabela 29 - Média dos módulos de elasticidade por famílias.	74

## Lista de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1 - Tipos de compósitos.	5
Figura 2 - Compósitos reforçados com fibras. (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas; (c) descontínuas e aleatoriamente orientada.	6
Figura 3 - Classificação quanto às matrizes utilizadas – Adaptado.	8
Figura 4 - Representações esquemáticas de como a forma da cadeia polimérica é influenciada pelo posicionamento dos átomos de carbono na cadeia principal.	10
Figura 5 - Cadeia molecular de um polímero que possui numerosas dobras e enovelamentos aleatórios, produzidos por rotações das ligações na cadeia.	11
Figura 6 - Ilustração da reação de polimerização – Adaptado.	11
Figura 7 - Características das fibras poliméricas – Adaptado.	13
Figura 8 - Fibras poliméricas. (a) Microfibra multifilamentadas; (b) Microfibra monofilamentadas; (c) Macrofibra monofilamentadas.	13
Figura 9 – Utilização de fibra de PP. (a) Pavimento industriais; (b) Concreto projetado com fibras; (c) Pavimento rígido para BRT na cidade de Belém/PA.	15
Figura 10 - Concreto com fibra. (a) Com compatibilidade (b) Sem compatibilidade dimensional entre fibras e o agregado graúdo.	17
Figura 11 - Formas de falha em concreto reforçado com fibras.	19
Figura 12 - Fluxograma da cadeia produtiva do seguimento de reciclagem de material plástico.	23
Figura 13 - Produção e rotas de destinação de plásticos – Adaptado.	25
Figura 14 – Processo de extrusão dos plásticos.	26
Figura 15 – Plástico reciclado. (a) Adquirindo forma de fios após extrusão; (b) Formato de grânulos.	27
Figura 16 - Ensaio granulométrico do agregado miúdo.	30
Figura 17 - Ensaio granulométrico do agregado graúdo	32
Figura 18 - Processo de obtenção do resíduo de GA.	35
Figura 19 - Resíduo de garrafão de água. a) Forma de monofilamentos; b) Forma triturada (comprimento de 5 cm).	35

Figura 20 - Fluxograma geral, caracterização do resíduo e ensaios mecânicos.	36
Figura 21 - Fluxograma da 1ª Etapa, caracterização dos materiais utilizados.	37
Figura 22 - Fluxograma da 2ª Etapa, caracterização do resíduo de GA.	37
Figura 23 – Seção transversal da fibra de GA por imagem de microscópio eletrônico.	39
Figura 24 – Ensaio de caracterização realizado com paquímetro. (a) Comprimento da fibra de GA; b) Diâmetro da fibra de GA.	39
Figura 25 – Exemplo com três amostras preparadas para ensaio de resistência à tração (dimensões em cm).	40
Figura 26 – Amostra posicionada com corte nas laterais para início do ensaio em máquina de tração.	41
Figura 27 – Amostras para ensaio de resistência ao ataque de álcalis. a) Fibras de GA imersas em solução de hidróxido de sódio; b) Amostras na estufa.	42
Figura 28 – Amostra de microfibras de polipropileno	42
Figura 29 – Corpos de prova cilíndricos e prismáticos moldados em formas metálicas.	45
Figura 30- Fluxograma dos ensaios mecânicos com 0% de adição de resíduo.	45
Figura 31 - Fluxograma dos ensaios mecânicos com 0,5% de adição de resíduo.	46
Figura 32 - Fluxograma dos ensaios mecânicos com 1% de adição de resíduo.	46
Figura 33 - Fluxograma da 3ª Etapa, ensaios mecânicos com 2% de adição de resíduo.	46
Figura 34 - Fluxograma da 3ª Etapa, ensaios mecânicos com adição de fibra comercial.	47
Figura 35 - Ensaio de resistência à compressão axial.	49
Figura 36 - Disposição do corpo de prova para ensaio de compressão diametral.	50
Figura 37 - Disposição do corpo de prova em perspectiva para ensaio de tração na flexão.	51
Figura 38 – Esquema do ensaio de tenacidade – Adaptado.	53
Figura 39 - Plano para obtenção direta do módulo de deformação tangente inicial.	54
Figura 40 – Amostras para ensaio de microscopia eletrônica de varredura.	55
Figura 41 – Curva carga x deslocamento das amostras de resíduo de GA.	59
Figura 42 – Amostras retiradas da estufa após 30 dias. (a) lavagem, (b) secagem; (c) pesagem.	61
Figura 43 – Ensaio de pH da solução após 30 dias de ensaio	61
Figura 44 - Resistência a compressão axial para idades de 28, 56 e 84 dias.	64
Figura 45 - Resistência à tração na compressão axial para idades de 28, 56 e 84 dias.	65
Figura 46 - Resistência à tração na flexão para idades de 28, 56 e 84 dias.	66
Figura 47 – Curva carga-deslocamento sob flexão em 4 pontos. 28 dias.	67

Figura 48 - Curva carga-deslocamento sob flexão em 4 pontos. 56 dias.	68
Figura 49 - Curva carga-deslocamento sob flexão em 4 pontos. 84 dias.	68
Figura 50 – Áreas para cálculo de tenacidade aos 28 dias.	69
Figura 51 – Áreas para cálculo de tenacidade aos 56 dias.	70
Figura 52 – Áreas para cálculo de tenacidade e aos 84 dias.	70
Figura 53 - Índices de tenacidade médio para cada família de compósitos.	71
Figura 54 – Módulo de Elasticidade para idades de 28, 56 e 84 dias.	73
Figura 55 – Imagens por microscópio óptico pós ensaio de tração. (a) Fibra de GA não rompida. (b) Fibra de GA não rompida com a ocorrência de alongamento. (c) Fibra de GA rompida com a ocorrência de alongamento. (c) Fibra de GA rompida sem a ocorrência de alongamento.	75
Figura 56 – Micrografias por MEV de amostras rompidas.	76

## Lista de Siglas

Apresenta-se em ordem alfabética a lista de siglas, contendo as abreviações de maior relevância.

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>
ABINAM	Associação Brasileira da Indústria de Águas Minerais
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AENOR	The Spanish Association for Standardization and Certification
ANAPRE	Associação Nacional de Pisos e Revestimento de Alto Desempenho
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASTM	American Society For Testing and Materials
BMC	Beverage Marketing Corporation
CRF	Concreto Reforçado com Fibra
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EN	Ensayo Normativo
EPS	Poliestireno Expandido
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Espuma Vinílica Acetinada
GA	Garrafão de água
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LVDT	Transdutor para medição de deslocamento linear
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PA	Pará
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PET	Politereftalato de Etileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PU	Poliuretanos
PVC	Poli Cloreto de Vinila
UFPA	Universidade Federal do Pará

## Lista de Símbolos

Apresenta-se em ordem alfabética a lista de símbolos, contendo as abreviações de maior relevância, outras denominações de ordem secundária são informadas ao longo do texto.

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
°C	Graus Celsius
μm	Micrometro
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	Propileno
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
cm	Centímetro
CP	Cimento Portland
dm	Decímetro
f <sub>ck</sub>	Resistência à Compressão Simples
f <sub>ct,k</sub>	Resistência à Tração na Flexão
g	Gramas
GPa	Gigapascal
kg	Quilograma
L	Litro
m	Metro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
TON	Tonelada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivo	4
1.3.1	Objetivo Geral	4
1.3.2	Objetivos Específicos	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	Materiais Compósitos	5
2.2	Matriz	7
2.3	Histórico da utilização das fibras	8
2.3.1	Fibras Poliméricas: Aspectos Gerais	10
2.3.2	Concreto reforçado com fibra (CRF)	16
2.4	Resíduos de Plásticos	21
2.4.1	Aspectos Gerais	21
2.4.2	Potenciais aplicações do resíduo	25
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>28</b>
3.1	Materiais	28
3.1.1	Cimento	28
3.1.2	Agregado Miúdo	29
3.1.3	Agregado Graúdo	31
3.1.4	Adição Mineral	32
3.1.5	Aditivos	33
3.1.6	Fibra Comercial	33
3.1.7	Resíduo de Garrafão de Água (GA)	34
3.2	Métodos	35
3.2.1	1ª Etapa: Caracterização dos Materiais	36
3.2.2	2ª Etapa: Caracterização do Resíduo	37
3.2.3	3ª Etapa: Ensaio Tecnológicos	42

3.3	Propriedades mecânicas do compósito	48
3.3.1	Resistência à Compressão Axial	48
3.3.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral	49
3.3.3	Resistência à Tração na Flexão	50
3.3.4	Análise da Tenacidade	51
3.3.5	Módulo de Elasticidade	54
3.4	Microscopia das fibras e dos compósitos com fibras de GA	55
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>56</b>
4.1	Propriedades do Resíduo	56
4.1.1	Características Geométricas das Fibras de Resíduo	56
4.1.2	Caracterização Mecânica do Resíduo	58
4.1.3	Resistência Química ao Ataque de Álcalis (Durabilidade)	61
4.2	Propriedades mecânicas do compósito	62
4.2.1	Ensaio de Compressão Axial	62
4.2.2	Ensaio de Tração na Compressão Axial	65
4.2.3	Ensaio de Tração na Flexão	66
4.2.4	Análise da Tenacidade	69
4.2.5	Módulo de Elasticidade	72
4.3	Microscopia óptica e Microscopia eletrônica por varredura (MEV)	74
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>77</b>
5.1	Conclusões	77
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	79
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>80</b>

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Considerações Gerais**

Os principais problemas enfrentados pela humanidade nos dias atuais são advindos dos efeitos causados pela poluição gerada nos grandes centros urbanos. Como exemplo, pode ser mencionado a grande produção de lixo urbano que ocasiona contaminação de lagos e rios, além das impurezas do ar, oriunda de indústrias de transformação, que contribui para o efeito estufa. Tudo o que é produzido pela natureza rapidamente se transforma. Porém, caso não se tome providências bem definidas para colaborar com a diminuição de descarte de materiais inservíveis, por si só, a natureza não terá condições de se manter sustentável. Portanto, com a reciclagem, o resíduo passa a ser tratado como matéria-prima alternativa que será utilizada para fabricar novos produtos, trazendo como vantagens a diminuição da quantidade dos materiais inservíveis que vai para os lixões, poupando os recursos naturais, reduzindo a poluição e, além de tudo, podendo gerar empregos. Em todos os setores da economia há uma grande importância de se fazer valer a sustentabilidade para que as gerações futuras tenham uma vida mais saudável.

De acordo com o Ministério de Meio Ambiente (2016), algumas características dos plásticos formados por polímeros que os tornam atrativos para a maioria dos usos a que estão associados, incluindo embalagens, são a sua força e resistência, durabilidade e longa vida, baixo peso, excelente barreira contra água e gases, resistência à maioria dos agentes químicos, excelente processabilidade e baixo custo. Tais propriedades, no entanto, são também um grande problema ao final da vida útil desses artefatos, especialmente o uso único em produtos como sacolas e embalagens. A sua inércia inerente permite que persistam no ambiente por anos e o seu baixo custo fazem com que sejam descartáveis em elevadas quantidades.

Não importa quantas vezes se pode reutilizar os plásticos tradicionais. Isto não leva ao seu desaparecimento. A maior parte (mais de 80%) dos plásticos pós-consumo no Brasil vai acabar depositada nos aterros sanitários, nos lixões, nas ruas, parques, lagos, rios, mares, ou seja, no meio ambiente, se acumulando nestes locais por décadas antes que comecem a se degradar (MMA, 2017).

No setor da construção civil, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Plástico – Abiplast (2016), os plásticos são muito utilizados em tubos, conexões, esquadrias, isolamento acústica e térmica. Materiais desta natureza vêm sendo utilizados para a redução do uso de concreto e conseqüente diminuição no peso das estruturas, melhorando inclusive as

características de segurança e resistência das construções. A utilização do plástico de conteúdo reciclado também contribui para a Certificação LEED (Certificação para Construções Sustentáveis), de construções sustentáveis (ABIPLAST, 2016).

Dentre a vasta gama de plásticos existentes no mercado, os garrafões de água mineral (GA) de fabricados com resina de polipropileno (PP) que de acordo com a resolução RDC (Resolução da Direita Colegiada) nº173/2006, no item 2.9 define embalagem (garrafões) como:

Artigo que está em contato direto com a água mineral natural ou com a água natural destinado a contê-las, desde a sua fabricação até a sua entrega ao consumidor, com a finalidade de protegê-las de agentes externos, de alterações e de contaminações, assim como de adulterações (ANVISA, 2006).

Sabe-se ainda que o tempo de vida útil e condições determinadas para consumo humano indireto de materiais, inclusive do GA, são condições estabelecidas por leis e/ou normas. Sendo assim, algumas empresas de reciclagem utilizam o rejeito do garrafão para outros fins, não podendo ser mais absorvido pelo setor alimentício, uma vez vencido seu prazo de validade e/ou com avarias.

Nesse interim, tendo como foco uma visão ecológica, vislumbra-se a reutilização do rejeito de GA, gerado a partir da fibrilação do mesmo após extrusão que acontecem em uma empresa de reciclagem situada no Aura - Ananindeua/PA, com a intenção de incorpora-lo como fibra ao concreto para pavimento, a fim de trabalhar como reforço e proporcionar ao compósito um melhor desempenho mecânico.

## **1.2 Justificativa**

A grande produção de plástico e seu baixo custo, contribuem para uma crescente geração de resíduo deste material, fato este que está relacionado diretamente com o meio ambiente devido à poluição gerada, bem como os impactos ambientais causados.

Os plásticos de uma forma abrangente são altamente convenientes devido à sua resistência à degradação, versatilidade, peso leve e baixo custo, conforme dito acima. Como resultado, seu uso aumentou em vinte vezes nos últimos 60 anos e também a quantidade de resíduos plásticos gerados (DIAZ-SILVARREY; PHAN, 2016). A EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América - EUA) estimou em 2016 que a quantidade de dióxido de carbono global proveniente dos resíduos plásticos esteja entre 100

e 300 milhões de toneladas. Para contextualizar esses números, o *Department for Transport* (2016), afirma que a quantidade gerada de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) proveniente da produção dos plásticos é equivalente às emissões de carbono de 21-63 milhões de carros movidos por um ano, o que representa 0,7 a 2 vezes o número total de veículos registrados no Reino Unido no final do ano de 2015.

Segundo dados da consultoria Beverage Marketing Corporation (BMC) para o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), em 2015, o mercado mundial de águas engarrafadas foi de 329 bilhões de litros, 16,5% superior ao valor de 2014. De acordo com dados da BMC, a taxa anual média de crescimento do mercado mundial de água engarrafada no período 2010 a 2015 foi de 6,9%, tendo a China crescido a uma taxa média anual de 14%, os Estados Unidos de 6%, e o Brasil de 4,1%. Em 2015, os maiores aumentos percentuais de consumo de água mineral em relação a 2014 ocorreram na Índia 122%, China 19%, Indonésia 28% e Estados Unidos 7,9%, tendo o Brasil crescido 4% no ano (DNPM, 2016).

O Brasil, segundo dados da BMC, é o 5º maior mercado consumidor de água engarrafada do mundo, tendo consumido 20,3 bilhões de litros em 2015, um crescimento de 4% em relação a 2014. A Associação Brasileira da Indústria de Águas Minerais - ABINAM, por sua vez, estimou o consumo per capita no Brasil em 99,2 litros/ano em 2015, 3 litros a mais do que o ano de 2014 (DNPM, 2016).

Estudos no ano de 2016 apontam que resíduos plásticos municipais (RPM) compreendem uma mistura de termoplásticos (polietileno de alta e baixa densidade, PEAD e PEBD; polipropileno, PP; poliestireno, PS; e tereftalato de polietileno, PET) e que a taxa de geração de RPM aumenta continuamente em 5% ao ano, enquanto a de reciclagem de RPM é de apenas 3% ao ano (DIAZ-SILVARRY; PHAN, 2016).

Os dados estatísticos apresentados acima, mostram a crescente produção de água engarrafada, logo, também há o aumento de fabricação de garrafas para armazenamento desta. Porém a problemática está no final da vida útil destes recipientes, pois a eliminação destes resíduos plásticos em aterros apresenta dois problemas: em primeiro lugar, como não são biodegradáveis, partem-se em pequenas partículas nocivas para a vida humana e selvagem, e, em segundo lugar, 4% da produção global de petróleo é utilizada na fabricação de produtos de plástico, dos quais 50% têm uma vida útil tão curta que as matérias-primas são eliminadas como resíduos em menos de um ano (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009).

## 1.3 Objetivo

Nesta etapa se faz presente os objetivos gerais e específicos planejados para atual pesquisa.

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho consiste em verificar a possibilidade de utilização do rejeito de garrafão de água mineral (GA) como fibras afim de reforçar o concreto para pavimento rígido.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Os principais objetivos específicos são:

- Caracterizar o resíduo de garrafão de água (GA) do ponto de vista geométrico, mecânico e químico;
- Obter o desempenho do compósito com o resíduo através dos ensaios mecânicos, como, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência de tração na flexão, módulo de elasticidade e tenacidade. Diante dos resultados apresentados, realizar análise comparativa do desempenho do concreto convencional (sem reforço), com adição de microfibra de polipropileno (PP) comercial e com adição do rejeito de GA com diferentes teores de incorporação, sendo eles, 0,5%, 1,0% e 2,0%.
- Investigar o comportamento da fibra de GA após os ensaios de tração dos compósitos cimentícios com microscópio óptico verificar a interação fibra matriz através de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Contribuir para diminuição dos impactos ao meio ambiente, pela produção de concreto sustentável, através do aproveitamento do resíduo de GA.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico do trabalho se faz um apanhado geral nas bibliografias pertinentes aos assuntos tratados por esta pesquisa, com intuito de tentar justificar supostos resultados obtidos nos ensaios realizados de acordo com os objetivos descritos no item 1.3.

### 2.1 Materiais Compósitos

Um material compósito pode ser definido como dois ou mais materiais (fases ou constituintes) integrados de modo a formar um novo material. Os constituintes mantêm suas propriedades, mas o compósito resultante terá propriedades diferentes destes. Normalmente, os componentes não se dissolvem um no outro, podendo ser identificados fisicamente por uma interface entre eles (SMITH; HASHEMI, 2012).

Muitos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases; uma é denominada matriz, a qual é contínua e envolve a outra fase, frequentemente chamada de fase dispersa. Havendo quatro divisões principais, que são compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras, os estruturais e o nanocompósito. A primeira divisão é equiaxial, ou seja, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções; na segunda divisão, a fase dispersa apresenta a geometria de uma fibra, ou seja, há uma grande razão entre o comprimento e o diâmetro; a terceira divisão possuem camadas múltiplas e são projetadas para apresentar baixa massa específica e alto grau de integridade estrutural; para os nanocompósitos, as dimensões das partículas da fase dispersa são de ordem manométricas. (CALLISTER, 2016).

Figura 1 - Tipos de compósitos.

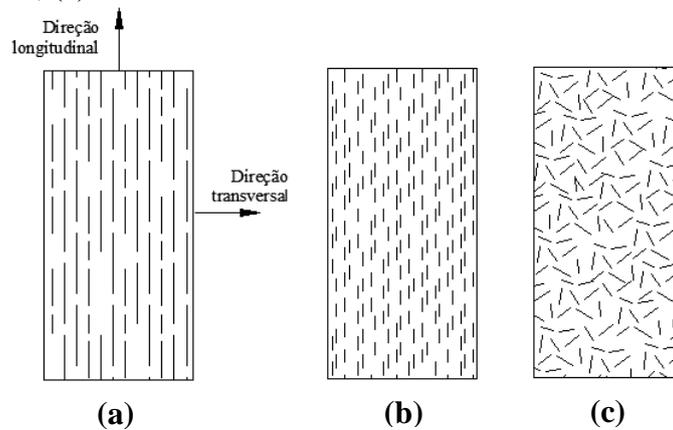


Fonte: CALLISTER, 2016.

De acordo com Callister (2016), compósitos com partículas grandes, ou seja, com enchimento modificam ou melhoram as propriedades do material e/ou substituem parte do volume do polímero por um material mais barato. O concreto, por exemplo, é um compósito com partículas grandes, composto por cimento (matriz) e agregados (particulados), ambos são classificados como materiais cerâmicos. Para o compósito reforçado por dispersão, temos os metais e as ligas metálicas, que podem ter uma resistência aumentada e ser endurecidos através da dispersão uniforme de uma certa percentagem volumétrica de partículas finas de um material inerte e muito duro.

Ademais, os compósitos podem ser estruturados com as fibras orientadas de forma contínua ou descontínua, ou ainda com as fibras aleatoriamente distribuída na matriz. As fibras orientadas podem estar dispostas independentemente na matriz ou estruturadas em tecidos. As fibras aleatórias podem estar dispostas ao acaso na matriz como um todo ou restritas a planos, normalmente em forma de mantas (CORREIA, 2011). Conforme ilustrada na Figura 2.

Figura 2 - Compósitos reforçados com fibras. (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas; (c) descontínuas e aleatoriamente orientada.



Fonte: CALLISTER, 2016.

Compósitos estruturais, como os laminares, são compostos por folhas ou painéis bidimensionais que possuem uma direção preferencial de alta resistência. Por exemplo, as folhas sucessivas de uma madeira compensada ou podem ser construídos empregando materiais na forma de tecido, tais como algodão, papel ou fibras de vidro trançadas. Outros, são os painéis sanduíches que trazem as folhas externas mais resistentes e encontram-se separadas por uma camada de material menos denso com menor rigidez. Esses painéis são

encontrados em ampla variedade, dentre as quais podemos citar, telhados, pisos e parede (CALLISTER, 2016).

De acordo com Callister (2016), os nanocompósitos, são partículas com tamanhos nanométricos e podem ser projetadas para possuir propriedades mecânicas, elétricas, magnéticas, óticas, térmicas, biológicas e de transporte que são superiores às de materiais carregados convencionalmente; podendo suas propriedades serem adaptadas para aplicações específicas. Por essas razões, os nanocompósitos estão se tornando parte de uma variedade de tecnologias modernas.

Para Picanço (2005), geralmente as propriedades finais do compósito são influenciadas pelas características individuais de seus constituintes e pelo método de fabricação do compósito, sendo elas, tipo, geometria, arranjo e distribuição, fração volumétrica, aspecto superficial, tratamento prévio, propriedades físicas, mecânicas e químicas das fibras; grau de aderência entre fibra e matriz; métodos de produção (mistura, adensamento e cura) do compósito.

Para esta pesquisa o compósito adotado foi de matriz cimentícia, reforçado com fibras, descontínuas e orientadas aleatoriamente, sendo esta a forma mais comumente utilizada para pavimentos rígidos, buscando determinar a influência desse reforço nas características físicas e mecânicas do compósito produzido.

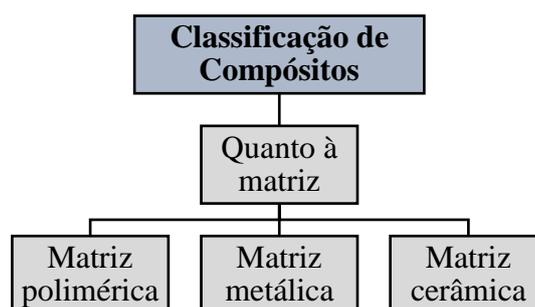
## **2.2 Matriz**

A matriz de um material compósito exerce total influência em suas propriedades, pois determina a resistência do compósito à maioria dos processos degradativos que causam eventualmente, a falha da estrutura, incluindo os danos de impacto, a de laminação, a absorção de água, ataque químico, resistência à corrosão e resistência à oxidação. Além de exercer influência nas propriedades do compósito, a matriz contribui para uma maior ou menor facilidade de conformação na fabricação do material compósito e influencia no custo final do produto (BARROSO, 2009).

Barroso (2009) também afirma que existem enormes possibilidades de características que podem ser usadas para a classificação dos materiais compósitos de acordo com os tipos de matérias primas utilizadas para sua produção.

De acordo com Callister (2016), os tipos de matérias prima utilizadas como matriz, podem ser de forma geral, classificados de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Classificação quanto às matrizes utilizadas – Adaptado.



Fonte: CALLISTER, 2016.

Dentre a vasta gama de classificações dos materiais compósitos, o concreto não deixa de ser rotulado como tal, pois conforme Figueiredo (2011) este é formado por várias fases, sendo, pasta de cimento, os agregados e os poros. De forma geral, sua matriz é classificada como cerâmica.

O comportamento pós fissuração do compósito sofre benefícios com o reforço em matrizes cerâmicas, como por exemplo, o concreto. Ele reduz ruptura abrupta, passando a apresentar, eventualmente, maiores deformações até a ruptura, levando, portanto ao aumento da tenacidade e da resistência ao impacto. Ou seja, o compósito apresenta um comportamento mais dúctil ao invés da ruptura brusca que ocorre em cimentos não reforçados (FREITAS, 2007).

### 2.3 Histórico da utilização das fibras

Dentre as fibras vegetais atualmente conhecidas estão, juta, sisal, fibra de bananeira, coco e outras que constituem materiais sustentáveis, já possuindo aplicações correntes e outras aplicações ainda sendo pesquisadas. Por outro lado, de muitas outras espécies vegetais brasileiras e suas respectivas fibras, pouco ou nada é conhecido sobre suas características e possíveis aplicações (GONÇALVES, *et al.*, 2018). As fibras naturais são um recurso renovável por excelência, onde absorvem a mesma quantidade de dióxido de carbono que produzem. Durante seu processamento, geram resíduos essencialmente orgânicos e deixam escórias que podem ser utilizados na geração de energia elétrica e, ao final de seu ciclo de vida, são 100% biodegradáveis (BRITO; ARAÚJO, 2011). Por outro lado, no que tange a utilização desse material fibroso na construção civil é relevante observar que tais fibras podem acarretar diminuição na resistência à compressão (PICANÇO, 2005). Não somente

isso, mas também as fibras em questão podem sofrer ataques de micro-organismos, por se tratarem de material orgânico (LUCENA, 2017)

As primeiras fibras empregadas na construção civil, sem caráter artesanal, foram as de amianto, no princípio do século XX. Nesta área, os compósitos reforçados com fibras são construídos por uma matriz frágil, que pode ser pasta, argamassa ou concreto de cimento Portland ou outro aglomerante (cal ou gesso) (TANESI, 1999). Para Picanço (2005), dentre as fibras naturais minerais o amianto se destaca, têm boa resistência a meios muito alcalinos e boas propriedades mecânicas para o uso em Engenharia, porém suas fibras provocam doenças, principalmente nas vias respiratórias dos trabalhadores durante a sua produção. Aliada a isso, há uma grave questão ambiental, pela formação de áreas degradadas após a extração do minério. Como esse é um recurso não renovável, existe ainda a tendência a um custo crescente desse produto, quando as reservas forem sendo esgotadas.

As fibras de aço e de vidro foram usadas nos primeiros trabalhos realizados para reforço nas décadas de 50 e 60. Desde então, no entanto, geometrias mais complicadas foram desenvolvidas, principalmente para modificar sua ligação mecânica com a matriz de cimento (BENTUR; MINDESS, 2007). Conforme Beglarigale e Yazici (2015) as fibras de aço melhoraram consideravelmente a resistência à tração e a resistência à flexão do concreto devido à sua capacidade de absorver energia e controlar as fissuras, fazendo com que as tornem adequadas para algumas aplicações especiais. No entanto, a corrosão das fibras de aço pode ser prejudicial e levar à rápida deterioração das estruturas de concreto (SOYLEV; OZTURAN, 2014). Já a fibra de vidro de acordo com Tassew e Lubell (2014) confere ao compósito uma excelente resistência, contudo esta fibra apresenta baixa resistência ao ataque de álcalis, como dito por Sayyar e Soroushian (2013).

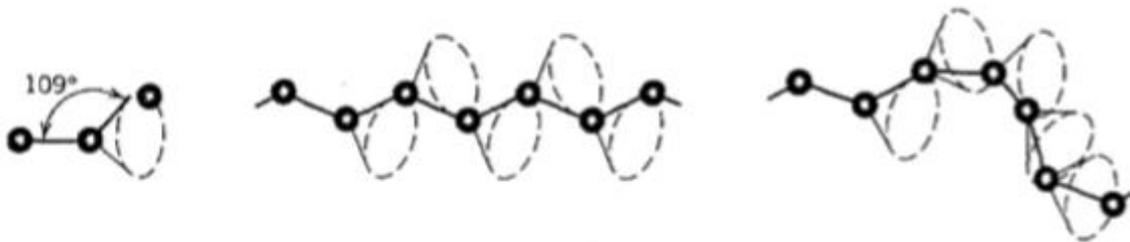
As fibras de polipropileno (PP) foram sugeridas como uma mistura ao concreto em 1965 por Goldfein para a construção de edifícios resistentes a explosões para o Corpo de Engenheiros dos EUA. O trabalho do referido pesquisador deu incentivo para ensaios iniciais sobre fibra de película de polipropileno em concreto pela *Shell International Chemical*, que deu ao material o nome “Caricrete”. Os primeiros trabalhos científicos foram descritos pelo cientista Zonsveld (HANNANT, 1978).

Após a introdução do tema, e uma vez que, o trabalho aborda a utilização das fibras de PP, mais detalhes sobre as mesmas serão apresentados a seguir.

### 2.3.1 Fibras Poliméricas: Aspectos Gerais

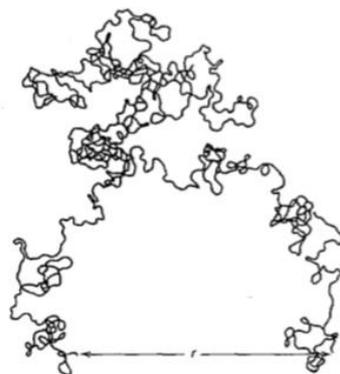
Os polímeros de forma geral são classificados como semicristalinos, pois podem variar desde completamente amorfo até quase totalmente (até aproximadamente 95%) cristalino, as ligações químicas simples encontradas nas cadeias dos polímeros são capazes de sofrer rotações e torções em três dimensões. Uma vez que, um átomo de carbono pode se localizar em qualquer posição sobre o cone de revolução e ainda assim formar um ângulo de aproximadamente  $109^\circ$  com a ligação entre os outros dois átomos (Figura 4). Dessa forma, uma molécula composta por uma única cadeia contendo muitos átomos pode assumir uma forma semelhante à representada esquematicamente na Figura 5, tendo uma grande quantidade de dobras, torções e degraus. Também está indicada nessa figura a distância ( $r$ ) de uma extremidade à outra da cadeia polimérica, essa distância é muito menor do que o comprimento total da cadeia. Os polímeros consistem em grandes números de cadeias moleculares, que podem dobrar, enrolar e contorcer da maneira mostrada na Figura 5. Isso leva a um extenso entrelace e embaralhamento entre cadeias moleculares vizinhas, criando uma situação semelhante àquela de uma linha de pesca altamente embaraçada. Essas espirais e entrelaces moleculares aleatórios são responsáveis por uma grande quantidade de características importantes dos polímeros, incluindo os grandes alongamentos elásticos exibidos pelas borrachas (CALLISTER, 2016).

Figura 4 - Representações esquemáticas de como a forma da cadeia polimérica é influenciada pelo posicionamento dos átomos de carbono na cadeia principal.



Fonte: CALLISTER, 2016.

Figura 5 - Cadeia molecular de um polímero que possui numerosas dobras e enovelamentos aleatórios, produzidos por rotações das ligações na cadeia.

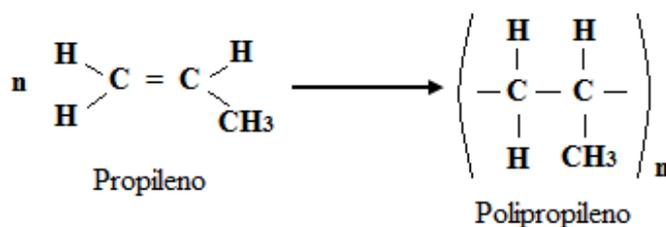


Fonte: CALLISTER, 2016.

Para reforço de materiais cimentícios as fibras sintéticas (poliméricas) vem ganhando importância, com destaque especial às de polipropileno (LUCENA, 2017).

A matéria-prima do polipropileno, derivada do  $C_3H_6$  monomérico, é um hidrocarboneto puro. O seu modo de polimerização, o seu alto peso molecular e a forma como é transformado em fibras combinam para transformar a estrutura química das fibras de polipropileno de semicristalina, conforme afirma Callister (2016) para materiais poliméricos, para cristalina, ou seja, adquirindo um arranjo atômico definido. Hannant (1978), nomeia essa estrutura regular como polipropileno isostático. Não há somente uma sequência aditiva dos monômeros que formam o polímero linear, como também, há um arranjo idêntico dos meros de propileno, de forma que os radicais estão sempre nas mesmas posições correspondentes dos meros (VAN VLACK, 2011).

Figura 6 - Ilustração da reação de polimerização – Adaptado.



Fonte: VAN VLACK, 2011.

Por apresentar as propriedades citadas, as fibras de polipropileno, são utilizadas de forma muito extensa e existem tipos que foram formuladas e produzidas especificamente para reforço de concreto (BENTUR; MINDESS, 2007). A Tabela 1 apresenta algumas propriedades de fibras sintéticas.

Tabela 1 – Propriedades gerais das principais fibras.

<b>Tipo de Fibra</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Densidade (g/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à Tração (GPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Alongamento último (%)</b>
<b>Acrílica</b>	20 - 350	1,16 - 1,18	0,2 - 1,0	14 - 19	10 - 50
<b>Aramida</b>	10 - 12	1,44	2,3 - 3,5	63 - 120	2 - 4,5
<b>Carbon (PAN)</b>	8 - 9	1,6 - 1,7	2,5 - 4,0	230 - 380	0,5 - 1,5
<b>Carbon (Pich)</b>	9 - 18	1,6 - 1,21	0,5 - 3,1	30 - 480	0,5 - 2,4
<b>Nylon</b>	23 - 400	1,14	0,75 - 1,0	4,1 - 5,2	16 - 20
<b>Poliéster</b>	10 - 200	1,34 - 1,39	0,23 - 12	10 - 18	10 - 50
<b>Polietileno</b>	25 - 1000	0,92 - 0,96	0,08 - 0,6	5	3 - 100
<b>Poliolefina</b>	150 - 635	0,91	275	2,7	15
<b>Polipropileno</b>	20 - 400	0,9 - 0,95	0,45 - 0,76	3,5 - 10	15 - 25
<b>PVA</b>	14 - 650	1,3	0,8 - 1,5	29 - 36	5,7
<b>Aço</b>	100 - 1000	7,84	0,5 - 2,6	210	0,5 - 3,5

Fonte: BENTUR; MINDESS, 2007.

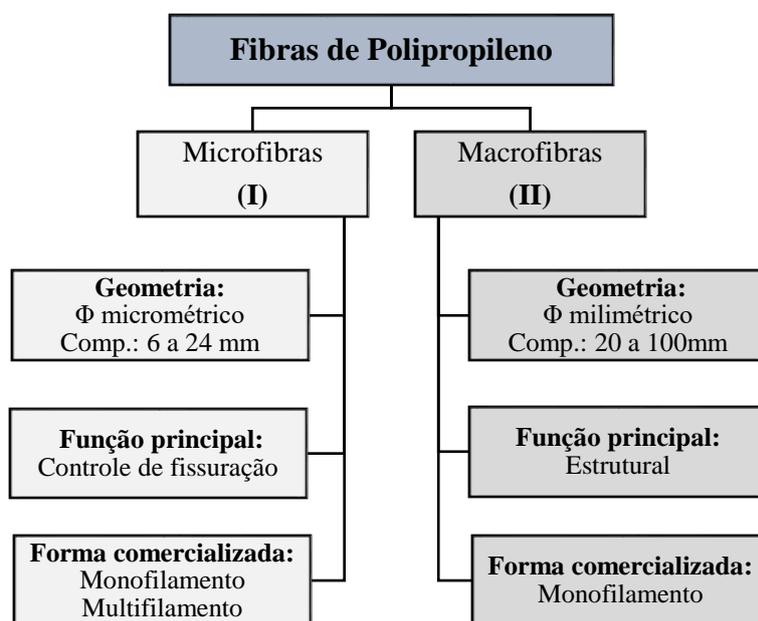
De acordo com Medeiros (2012), as fibras poliméricas, quanto a sua geometria são divididas em microfibras e macrofibras. O uso de microfibras de polipropileno já é comum no Brasil e no mundo, sua utilização ganhou popularidade por causa de suas vantagens sobre as fibras metálicas, com especial atenção à estabilidade química, leveza e trabalhabilidade. As fibras poliméricas, particularmente as fibras à base de polipropileno, foram consideradas benéficas na redução da fissuração por retração e na melhoria da resistência à abrasão do concreto (HESAMI; HIKOUEI; EMADI, 2016).

As macrofibras sintéticas não são usadas apenas para controlar a retração plástica, mas também são usadas para controlar a exsudação, assim como as microfibras. As fissuras por retração ocorrem devido à perda de moléculas de água do concreto endurecido (JAFARIFAR; PILAKOUTAS; BENNETT, 2014). Esse tipo de retração por secagem pode ocorrer em grandes áreas planas, como lajes e pavimentos rígidos. Uma malha de reforço de aço é normalmente usada para evitar as fissuras por retração, mas atualmente está sendo gradualmente substituído pelas macrofibras sintéticas por causa da facilidade de construção, mão-de-obra reduzida e custo mais baixo. Outro benefício significativo é o desempenho pós-fissura proporcionado pelas macrofibras (BURATTI; MAZZOTTI; SAVOIA, 2011). O concreto simples frágil não apresenta ductilidade efetiva pós-fissuração, mas as fibras sintéticas podem melhorar consideravelmente a resposta pós-fissuração do concreto, pois atuam como trava-quedas e alteram a matriz de concreto intrinsecamente frágil em um material resistente. Resistência a rachaduras e ductilidade. Portanto, quando o concreto se rompe, as grandes fissuras simples comuns podem ser substituídas por microfissuras densas devido à presença de reforço de fibra (BRANDT, 2008). No país o uso de macrofibras de

polipropileno ainda é incipiente e a comercialização dessas fibras no âmbito nacional ainda é pequena ao contrário dos Estados Unidos e Europa que o uso dessas fibras já é bastante difundido.

Desta forma, as características principais das fibras poliméricas são apresentadas em fluxograma da Figura 7, de acordo com os tipos encontrados no mercado, que são: microfibras (I) e macrofibras (II). Para cada tipo de fibra exibe-se suas geometrias, principais funções e formato comercializado. Assim sendo, a Figura 8 ilustra imagens para melhor entendimento sobre os formatos e tipos das fibras encontradas no mercado.

Figura 7 - Características das fibras poliméricas – Adaptado.



Fonte: MEDEIROS, 2012.

Figura 8 - Fibras poliméricas. (a) Microfibras multifilamentadas; (b) Microfibras monofilamentadas; (c) Macrofibras monofilamentadas.



Fonte: FIGUEIREDO, 2011.

Reitera-se que, as microfibras auxiliam a reduzir a fissuração por retração e controle de exsudação, pois conforme Figueiredo *et al.* (2002) isso se dá pela dificuldade que a fibra propicia à movimentação da água no interior do concreto, aumentando a sua coesão. Esse aumento pode ser desejável para alguns usos específicos como o concreto projetado ou pré-moldado, minimizando os riscos de deslocamentos e garantindo a estabilidade dimensional do concreto recém desformado.

Atualmente, as fibras de polipropileno vêm sendo utilizadas em obras civis como a execução de túneis, que de acordo com o fabricante NEOMATEX<sup>®</sup> as aplicações das fibras para túneis são para revesti-los, de forma convencional ou projetada. Dependendo da necessidade técnica, as fibras para túneis podem ser combinadas também com outros materiais como o aço, para a composição do concreto de revestimento. Quando as fibras para túneis têm propósito de suporte estrutural, são utilizadas as macrofibras sintéticas estruturais, para conferir tenacidade ao concreto. Entretanto, para o aumento da resistência ao fogo dos revestimentos de túneis em concreto, as microfibras de polipropileno são mais utilizadas, devido seu baixo ponto de fusão. Figueiredo *et al.* (2002), afirma que a resistência à ação do fogo pelo concreto pode ser melhorada com a adição de fibras de polipropileno. O aumento da pressão de vapor e das tensões de tração no interior do concreto, que causam o lascamento explosivo e posteriormente a sua ruptura, pode ser diminuído pela fusão das fibras. As fibras, por possuírem temperatura de fusão em torno de 165°C, ao se fundirem criam pequenos vazios e canais que permitem a dissipação dessa pressão de vapor, diminuindo assim as tensões de tração internas e a deterioração do concreto. Sem a ocorrência do destacamento, as camadas superficiais do concreto, mesmo calcinadas, protegem as mais internas e retardam ou evitam o colapso do túnel. Não sendo utilizadas somente para túneis, as fibras de polipropileno, também são aplicadas em pisos industriais e pavimentos rígidos, como executado na Região Metropolitana de Belém/PA, o BRT (Bus Rapid Transit), implantado na Av. Augusto Montenegro teve a inserção da tecnologia de reforço com fibras, sendo utilizadas com a finalidade de controle de fissuração, haja vista que, na região a condição climática existente é sujeita às variações de temperatura que causam gradiente térmico considerável, induzindo a um estado de fissuração de origem térmica ainda fase plástica (SILVA; SILVA JUNIOR, 2017).

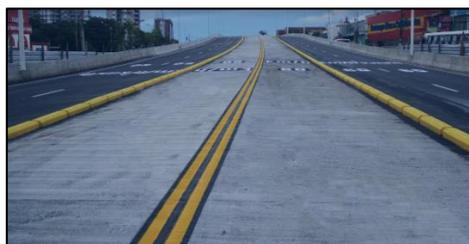
Figura 9 – Utilização de fibra de PP. (a) Pavimento industriais; (b) Concreto projetado com fibras; (c) Pavimento rígido para BRT na cidade de Belém/PA.



(a)



(b)



(c)

Fonte: PUJADAS, 2018; [www.djc.com](http://www.djc.com); <http://brt.belem.pa.gov.br/>.

No que se refere as propriedades individuais de fibras poliméricas, na pesquisa de Cáceres (2016) foi realizado ensaios de caracterização em dois tipos (A – em formato de corda; B – em formato de filete reto) de macrofibras de polipropileno disponíveis no mercado, as cargas máximas obtidas em ensaio de resistência a tração, apresentaram como valores médios de carga para o tipo A e B, 48,64N e 53,02N, respectivamente. Para análise geométrica, os resultados das seções transversais, foram realizados os métodos de medidas através do paquímetro e imagens digitais. Onde os valores obtidos no método do paquímetro para a macrofibra A e B, foram respectivamente, 0,09mm<sup>2</sup> e 0,06mm<sup>2</sup>. Em contrapartida, para o método de imagem digital, foram obtidos resultados de 0,13mm<sup>2</sup> e 0,08mm<sup>2</sup>, mostrando uma pequena variação para cima entre o primeiro e o segundo método, que podem ter ocorrido por conta de uma pressão em excesso dada ao paquímetro no momento da medida do diâmetro da fibra, logo, reduzindo o mesmo e consequentemente da área da seção. De acordo com a medidas das áreas de seções, foram avaliadas as tensões de resistência a tração, para as áreas obtidas pelo paquímetro os valores para macrofibras A e B, respectivamente obteve-se 562,28MPa e 817,25MPa e com o método de imagem digital as tensões foram 376,66MPa e 660,28MPa para as macrofibras A e B, nesta ordem. Para o ensaio de módulo de elasticidade das macrofibras A e B, apresentou-se respectivamente valores de 3,42GPa e 3,62GPa.

Em outra pesquisa realizada por Yin et al. (2013) que teve como objeto o estudo das propriedades mecânicas de três tipos de fibras de plástico para reforço de concreto, a primeira com 100% de polipropileno (PP) virgem, a segunda com 100% de PP reciclado, que foram preparadas pelo processo de extrusão e de estampagem a quente e a terceira com 50% de PP virgem e 50% de PP reciclado. Nesta ordem respectivamente, foram obtidos como resistência à tração 437MPa, 313MPa e 364MPa e para módulo de elasticidade as fibras apresentaram 8,68GPa, 6,19GPa e 8,04GPa, na mesma ordem. A fibra de PP reciclada, no entanto, apresentou menor resistência à tração e módulo de elasticidade do que a fibra de PP virgem. Quando 50% do PP virgem foi misturado com 50% do PP reciclado, o módulo é significativamente melhorado. Tanto a fibra de PP 100% reciclada como a fibra com 50% de PP reciclado e 50% de PP virgem obtiveram alta resistência à tração e o módulo, suficiente para reforçar concreto. A matéria-prima do PP reciclado apresentou menor massa molecular, menor cadeia molecular e moléculas mais defeituosas do que a PP virgem, devido à degradação em sua vida útil e estágio de processamento térmico. Porém o processo de estiramento a quente tornou as moléculas das fibras altamente orientada, melhorando assim a cristalinidade (passando de 50% de grau de cristalinidade para mais de 80%) e a temperatura de fusão cristalina das fibras. Desta forma, esse estudo demonstrou que as propriedades das fibras recicladas podem ser melhoradas com uso apropriado de tecnologia para beneficiamento destas.

Entre os resultados dos estudos apresentados não há grande divergência quanto a resistência a tração e módulo de elasticidade, apesar da primeira pesquisa se tratar de fibras de polipropileno comerciais, ou seja, essas são tratadas especificamente para tal finalidade. No segundo estudo também se refere a fibras de polipropileno 100% virgem e polipropileno reciclado, no entanto, passaram por processo de beneficiamento adequado para utilização desta como fibra.

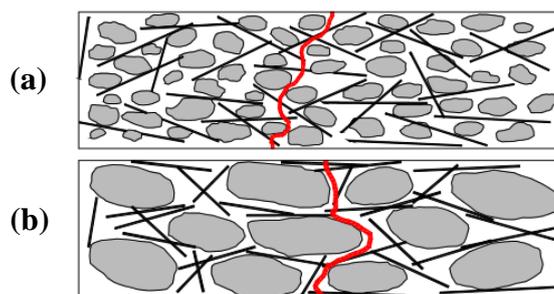
### 2.3.2 Concreto reforçado com fibra (CRF)

O concreto com fibras contém cimento hidráulico, água, agregados miúdos, agregados graúdos e fibras discretas descontínuas, podendo também ter aditivos químicos e adições minerais para melhorar a sua resistência e/ou trabalhabilidade (MEDEIROS, 2012). Uma vez que, possa ter a redução do abatimento com o aumento da incorporação do volume de fibra.

Mogre e Parbat (2012), afirmam que o uso de alta fração volumétrica de fibras de polipropileno para o concreto é vantajoso, pois inibe fissuras por retração plástica, aumenta a resistência à tração, aumenta a resistência à flexão, aumenta a resistência à fadiga, aumenta em geral a durabilidade e a resistência à fissuração, impede o lascamento, fornece resistência ao impacto, fornece resistência à abrasão e aumenta a tenacidade.

Em relação a dimensão do agregado, quanto maiores, os problemas de interferência fibra-agregado aumentam, o que compromete o efeito favorável do uso da fibra. Deve haver compatibilidade dimensional entre os agregados e as fibras, de modo que as fibras interceptem com maior frequência possível as fissuras que ocorrem no concreto, conforme Figura 10. A compatibilidade dimensional, possibilita a atuação da fibra como reforço do concreto e não como mero reforço da argamassa do concreto. Essa compatibilidade é importante, pois as fissuras se propagam preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta para concretos de baixa e moderada resistência mecânica. (FIGUEIREDO, 2000). Haja vista que, no compósito a zona de transição serve como ponte entre os dois componentes: a matriz argamassa e as partículas de agregado graúdo. Mesmo quando os componentes individuais possuem alta rigidez, a rigidez do compósito é reduzida em função das zonas fragilizadas (isto é, vazios e microfissuras na zona de transição na interface), que não permitem transferência de tensão (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 10 - Concreto com fibra. (a) Com compatibilidade (b) Sem compatibilidade dimensional entre fibras e o agregado graúdo.



Fonte: FIGUEIREDO, 2000.

Diante da compatibilidade dimensional entre fibra e agregado graúdo, Figueiredo (2011) afirma que, é recomendado a utilização de fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo usado no concreto.

De acordo com a afirmativa acima, criou-se a Tabela 2 de orientação no que se refere ao tamanho adequado de fibra dependendo do diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado no concreto.

Tabela 2 - Comprimento das fibras em relação ao diâmetro máximo do agregado graúdo.

<b>Agregado Graúdo</b>	<b>Φ max (mm)</b>	<b>Comp. Fibra (mm)</b>
Brita 0 (*)	9,5 (*)	≤ 19
Brita 1 (*)	19 (*)	≤ 38
Brita 2 (*)	25 (*)	≤ 50
Brita 3 (*)	50 (*)	≤ 100
Brita 4 (*)	76 (*)	≤ 152
Seixo Fino (**)	8 (**)	≤ 16
Seixo Médio (**)	16 (**)	≤ 32
Seixo Grosso (**)	32 (**)	≤ 64
Seixo Muito Grosso (**)	64 (**)	≤ 128

(\*) Dados colhidos MME – Ministério de Minas e Energia.

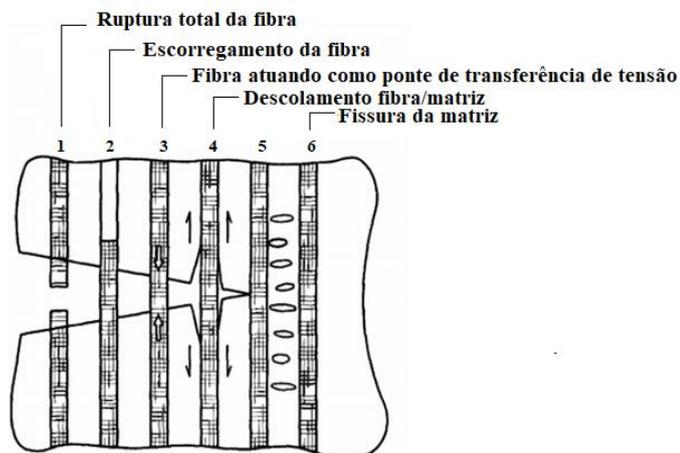
(\*\*) WENTWORTH, 1922.

Conforme Bentur e Mindess (2007) a fibra sintética tem como desvantagem uma fraca aderência com a matriz cimentícia. No entanto, para Medeiros (2012), há um delicado equilíbrio para se otimizar a aderência entre a fibra e a matriz. Se as fibras tiverem pouca aderência com a matriz podem escorregar sob carregamentos baixos e não contribuem muito para diminuir a fissuração. Nessa situação as fibras não aumentam a tenacidade do sistema. Por outro lado, se a aderência à matriz for muito alta, muitas das fibras podem se romper antes de dissipar energia escorregando. Nesse caso as fibras se comportam como inclusões inativas, produzindo apenas uma melhoria periférica das propriedades mecânicas. Então, para contribuição da aderência da fibra com a matriz cimentícia, Mehta; Monteiro (2014) diz que, adições minerais podem favorecer o fortalecimento da zona de transição na interface fibra-matriz. Uma vez que, há o refinamento dos poros e uma durabilidade muito maior no que diz respeito ao ataque e à expansão pela reação álcali agregado.

De acordo com Yin *et al.* (2015), as fibras sintéticas podem prevenir fissuras de retração plástica em concreto fresco e melhorar o comportamento pós-fissuração do concreto. A Figura 11 ilustra esquematicamente diferentes formas de fratura associadas ao concreto reforçado com fibras. Onde pode acontecer: (1) a ruptura total da fibra; (2) ocorrer o escorregamento da fibra na matriz (*pull-out*); (4) podem efetivamente absorver e dissipar energia para estabilizar a propagação da trinca no concreto; (3) a fibra que liga as trincas reduz a intensidade do estresse na ponta da fissura. Além disso, a ponte que a fibra proporciona pode diminuir a largura da fissura, o que impede a entrada de água e contaminantes na matriz de concreto; (5) impede a propagação de uma ponta de trinca. Conseqüentemente, pequenas rachaduras serão distribuídas em outros locais da matriz (6).

Embora cada fibra individual faça uma pequena contribuição, o efeito geral do reforço é acumulativo (ZOLLO, 1997)

Figura 11 - Formas de falha em concreto reforçado com fibras.



Fonte: ZOLLO, 1997.

Neville e Brooks (2013) também associa o aumento da resistência à tração por retardo da propagação de fissuras e pelo aumento da tenacidade por meio da transmissão de tensões através de uma seção fissurada, de tal forma que seja possível uma deformação muito maior após a tensão de pico do que sem o reforço com fibras. No estudo realizado por Oucief *et al.* (2006) que analisaram o comportamento de concreto reforçado com fibras híbridas (aço e polipropileno), somente com fibra de aço e somente com fibra de polipropileno, foi constatado que o desempenho do concreto com relação a tenacidade foi melhorado significativamente com reforço de fibras híbridas e somente com reforço de fibras de polipropileno no que concerne ao concreto sem reforço.

Para Fallaf e Nematzadeh (2017) há uma diferença no comportamento dos compósitos reforçados com macrofibras e microfibras, pois a utilização de macrofibras melhora significativamente a resistência à tração do concreto devido à sua forma e comprimento, uma vez que uma ligação forte é desenvolvida em todo o concreto matriz sob esforços de tração impedindo a propagação de microfissuras. No entanto, as microfibras têm menor comprimento e menor resistência à tração em comparação com as macrofibras, elas efetivamente impedem o desenvolvimento de microfissuras nos estágios iniciais de sua formação, porém após a fissura do concreto, as microfibras não atendem totalmente à sollicitação das deformações causadas pelas forças de tração, assim ocasionando um efeito não muito significativa correlação a resistência à tração.

Com relação a melhoria na resistência à compressão do concreto reforçado com fibras é atribuída à capacidade das fibras de restringir e retardar a propagação da fissura e reduzir a extensão da concentração de tensão na ponta da fenda. Como as microfissuras são abundantes em todo o corpo do concreto, as microfibras de polipropileno lidam melhor com essas microfissuras por possuírem dimensões menores em comparação às macrofibras poliméricas, que conseqüentemente aumenta a resistência à compressão. No entanto, devido à sua escala macro e maior comprimento, as macrofibras poliméricas não participam efetivamente no carregamento de carga até que o ponto de carga máximo seja atingido, porém quando chega próximo do momento da falha da amostra, as macrofibras entram em jogo, aumentando a ductilidade e impedindo a propagação de microfissuras e rachaduras (FALLAF; NEMATZADEH, 2017).

Para Köroglu (2017) que realizou um estudo com a adição de macrofibras de polipropileno reciclado e copolímeros para reforço de concreto, afirmou ter tido melhoria satisfatória no controle de fissuração do concreto, resistência à compressão, resistência à flexão e resistência à tração. O autor trabalhou com as frações volumétricas de 0%, 0,125%, 0,25% e 0,5%, onde obteve-se respectivamente os valores para compressão, 25,05MPa, 27,96MPa, 30,68MPa e 30,93MPa, em percentual se teve em média um acréscimo de 19,13%. Para resistência à flexão, na mesma ordem foram obtidos os valores de 2,99MPa, 3,11MPa, 4,29MPa e 4,38MPa, tendo como média um acréscimo de 31,3%. Para a resistência à tração obteve-se respectivamente, 2,36MPa, 2,57MPa, 2,64MPa e 2,79MPa, em média um acréscimo de 13%, percebendo assim, um aumento considerável nas propriedades mecânicas do compósito com as variações nas frações volumétricas.

No estudo descrito por Hesami *et al.* (2016) que utilizaram a microfibras de polipropileno para reforço de pavimento em concreto, o efeito ocorrido para a resistência a compressão foi inverso ao do estudo citado anteriormente, porém a resistência à tração e flexão também sofreram acréscimos com o aumento das frações volumétricas incorporadas ao concreto. Para a adição da microfibras de polipropileno os autores utilizaram frações volumétricas de 0%, 0,1% e 0,12%, que por sua vez, sob ensaio de compressão apresentaram valores em resposta de 78,05MPa, 79,65MPa e 74,53MPa, respectivamente, que em percentual médio houve um decréscimo de -1,23%. Em contrapartida, para o ensaio de resistência a tração, na mesma ordem apresentou-se os valores de 4,90%, 5,85MPa e 6,27MPa, em média cresceu 23,67% com relação a variação das frações volumétricas. Da mesma forma ocorreu na resistência à flexão, que em média apresentou acréscimo de 29,58%, com os valores de 8,45MPa, 10,66MPa e 11,24MPa, em ordem crescente de adição.

Ademais, quanto à degradação, as fibras poliméricas ao ser incorporada em matriz cimentícia traz uma vantagem consigo, pois não sofrem ataques de micro-organismos, como é o caso da fibra vegetal; corrosão, quando se trata de fibra de aço e degradação em meio alcalino do cimento, como as fibras vegetais e de vidro (LUCENA, 2017).

No interim das pesquisas citadas neste item, não há dúvidas que a adição tanto de microfibras como de macrofibras de polipropileno causam efeitos positivos nas resistências à tração e flexão. Todavia, no que tange a resistência à compressão do compósito com adição de macrofibras, se tem impactos favoráveis no concreto, contudo, esta mesma propriedade se mostra inversa quando adicionada ao concreto a microfibra.

## **2.4 Resíduos de Plásticos**

Neste item de forma geral apresenta-se a classificação normativa dos resíduos plásticos, bem como os tipos de resíduos plásticos e simbologias utilizadas para identificação visual destes. Expõe também, a cadeia produtiva dos plásticos e possíveis serventias dos resíduos de acordo com o tipo de reciclagem.

### **2.4.1 Aspectos Gerais**

Lixo, ou resíduo sólido, é normalmente definido na literatura como sendo produto da atividade humana e considerado, pelo gerador, como sem utilidade, descartável e/ou indesejável (OLIVEIRA, 2012).

De acordo com a NBR 10004 os resíduos se classificam em:

- Resíduos Classe I – Perigosos: são aqueles que representam periculosidade, ou uma das características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Resíduos Classe II – Não Perigosos.
- Resíduos Classe II A – Não Inertes: são os que não se enquadram nem como perigosos nem como inertes, podendo ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos Classe II B – Inertes: são aqueles que após o ensaio de solubilização não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos

padrões de potabilidade de água (com exceção de aspecto, turbidez, dureza e sabor) (ABNT, 2004).

Os resíduos plásticos são inseridos na classificação de resíduos sólidos não perigosos. Não se enquadrando, portanto, na classe I.

Diversas são as utilizações dos materiais plásticos, isto se dá devido as vastas características que estes podem ter. A Tabela 3 ilustra as simbologias por tipo de plásticos, conforme ABNT NBR 13230:2008 e algumas de suas aplicações.

Tabela 3 - Tipos, aplicações e simbologias dos plásticos segundo a ABNT NBR13230 – Adaptado.

	Tipos	Aplicações	Simbologia
Termoplásticos	<b>Polietileno Tereftalato – PET</b>	Frascos de refrigerantes, produtos farmacêuticos, produtos de limpeza, mantas de impermeabilização	
	<b>Polietileno de Alta Densidade - PEAD</b>	Embalagens para cosméticos, produtos químicos e de limpeza, tubos para líquidos e gás, tanques de combustível para veículos automotivos;	
	<b>Policloreto de Vinila - PVC</b>	Tubos e conexões, calçados, encapamentos de cabos elétricos, equipamentos médico-cirúrgicos, esquadrias e revestimentos;	
	<b>Polietileno de Baixa Densidade - PEDB</b>	Embalagens de alimentos, sacos para lixo, embalagens e rótulos de brinquedos;	
	<b>Polipropileno - PP</b>	Embalagens de massas e biscoitos, potes de margarina, seringas descartáveis, equipamentos médico-cirúrgicos, para-choques de carro);	
	<b>Poliestireno - PS</b>	Copos descartáveis, placas isolantes, aparelhos de som e tv., embalagens de alimentos, revestimento de geladeiras, material escolar;	
	<b>Outros</b>	Plásticos especiais e de engenharia, CDs, eletrodomésticos, corpos de computadores,	
Termofixos	<b>Poliuretanos - PU, Poliacetato de Etileno Vinil – EVA, etc.</b>	Interruptores, peças industriais elétricas, peças para banheiro, pratos, travessas, cinzeiros, telefones e etc.	

Fonte: ABNT NBR 13230:2008.

No entanto, como já dito, apesar da diversificação de tipos de plásticos existente hoje no mercado, todos os resíduos gerados por estes são classificados como resíduos sólidos não perigosos. Porém, de acordo com Spinacé e De Paoli (2005), quando descartados inadequadamente, como em rios, encostas, lixões, etc., os resíduos poliméricos causam diversos danos ambientais.

Mediante o exposto acima, uma forma de reduzir esta problemática é a reciclagem, que segundo Canellas (2005), é um conjunto de técnicas que tem por finalidade aproveitar

os detritos reutilizando no ciclo de produção, ou seja, é o resultado de uma série de atividades, pelas quais materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são coletados, separados e processados para serem utilizados como matéria-prima na manufatura de novos produtos.

A Associação Brasileira da Indústria do Plástico – Abiplast, através da Figura 12 demonstra a cadeia produtiva do seguimento de reciclagem de material plástico.

Figura 12 - Fluxograma da cadeia produtiva do seguimento de reciclagem de material plástico.



Fonte: ABIPLAST, 2016.

Também é importante enfatizar que, para uma eficiência do sistema de reciclagem é interessante que se use embalagens compostas pelo menor número possível de resinas diferentes. Desta forma, seria necessário a criação de uma destinação correta para os galões de águas vencidos, que por sua vez, não podem voltar a exercer a mesma função no setor alimentício.

A reciclagem de materiais plásticos se faz benéfica para alguns setores socioambientais. Pesquisas apontam que para cada tonelada de material reciclado, obtém-se uma redução de emissão de 1,53TON de gases de efeito estufa na atmosfera; em média há uma redução de 1,1TON de rejeito plástico dispostos em aterros; economia média de 75% de energia; evita-se 450L de água na produção; gera empregos de 3,16 catadores para recolher esse volume de matéria no mês (ABIPLAST, 2016).

Por fim, a reciclagem traz diversos benefícios, porem conforme aborda o Portal de resíduos sólidos, uma das principais questões é o sistema de coleta seletiva e triagem (considerando abrangência e eficiência), pois uma das dificuldades técnicas em se reciclar

os resíduos plásticos pós-consumo está no fato dos diferentes tipos de resinas se encontrarem misturados. Uma das formas de fazer essa separação leva em conta características físicas e de degradação térmica do material. Plásticos com mesmas características são reciclados conjuntamente.

O garrafão de água enquadra-se no grupo de materiais de Polipropileno (PP) que é uma das resinas mais consumidas no Brasil. Conforme Abiplast (2016) a Tabela 4 demonstra o resumo da cadeia produtiva do plástico no País.

**Tabela 4 - Principais resinas consumidas no Brasil – Adaptado.**

<b>Resinas</b>	<b>Consumo em 2016 (%)</b>
PP	22,30
PVC	15,60
PEAD	17,40
PEBD	10,60
PEBDL	12,40
PET	7,10
PS	4,60
EPS	2,30
EVA	1,40
Plásticos de engenharia	6,10

Fonte: ABIPLAST, 2016.

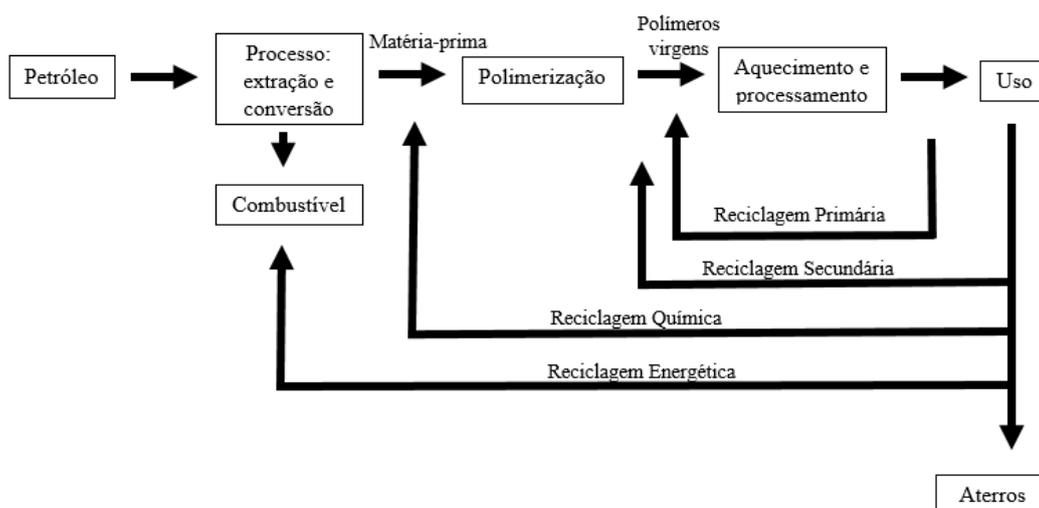
Apesar do polipropileno ser uma das resinas mais utilizadas no Brasil, a Portaria n° 128/11 que altera a Portaria n° 387/08, do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), do Ministério de Minas e Energia, determinou que garrafões retornáveis de 10 e 20 litros com mais de três anos de fabricação fossem recolhidos e inutilizados para a mesma função (BRASIL, 2011).

Desde então, alguns jornais como o Gazeta Povo de Curitiba, vêm informando a dificuldade para os vendedores de água engarrafada armazenarem os garrafões vencidos. Uma vez que, toda responsabilidade de destinação final do mesmo será do praticista. Em 2010 o jornal apontou que não haviam dados exatos da quantia de galões vencidos, mas estimativas do setor apontavam que, em setembro de 2008, quando a primeira portaria entrou em vigor, cerca de um milhão de embalagens vencidas estavam em circulação no Paraná.

## 2.4.2 Potenciais aplicações do resíduo

A inserção dos resíduos de plásticos novamente no mercado está diretamente ligada ao seu processo de reciclagem, que podem ser classificadas como reciclagem primária, secundária, terciária e quaternária, conforme a Figura 13 que ilustra a produção dos plásticos e suas rotas de retorno para a reciclagem.

Figura 13 - Produção e rotas de destinação de plásticos – Adaptado.



Fonte: OLIVEIRA, 2012.

- **Reciclagem primária**

Consiste no reaproveitamento das aparas, das rebarbas e das peças defeituosas dentro da linha de montagem das próprias indústrias. Muitas empresas do setor já adotam tal procedimento visando a diminuição de seus custos, outras vendem esses resíduos para empresas recuperadoras. Entretanto, deve-se tomar um especial cuidado na sucessiva repetição desse aproveitamento, pois poderá acarretar degradação do material diminuindo sua qualidade (CANELLAS, 2005).

- **Reciclagem secundária**

São reaproveitados materiais chamados de resíduos pós-consumo. Canellas (2005) diz que, e a reciclagem de parte dos rejeitos existentes no lixo propriamente dito. Essa reciclagem pode ser feita nas Usinas de Compostagem e Reciclagem ou através de coleta seletiva.

Para Aguiar Neto et al. (2016), o resíduo de garrafão de água de 20 litros foi utilizado após trituração do material em fábrica de reciclagem para substituição parcial do agregado graúdo do concreto em teores de 10, 30 e 50%, para as idades de 7 e 28 dias. A

substituição em 10% de agregado natural por agregado reciclado apresentou melhores resultados, porém, as demais substituições mostraram resultados aceitáveis para serem utilizados na construção civil, vislumbrando a viabilidade da utilização desses materiais como agregados alternativos para produção de concretos.

- **Reciclagem terciária ou química**

É a transformação dos resíduos polímeros em monômeros e em outros produtos químicos através de decomposição química ou térmica. Após esta operação, o produto poderá ser novamente polimerizado, gerando novas resinas plásticas (CANELLAS, 2005).

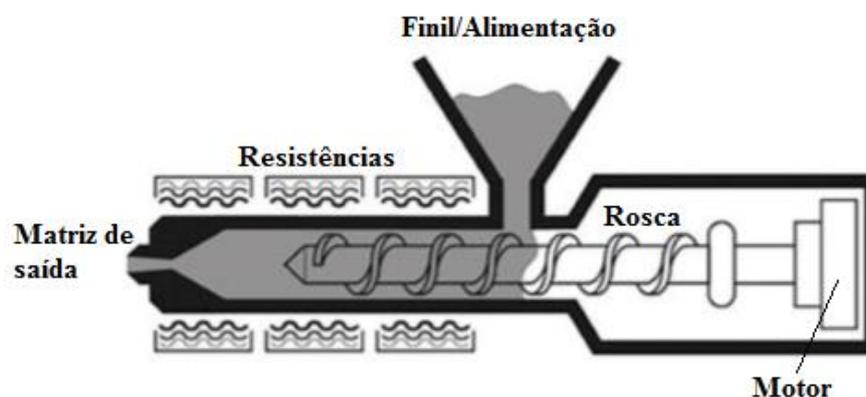
- **Reciclagem quaternária ou energética**

É um método de reciclagem que tem crescido muito nos últimos anos. A queima dos resíduos para gerar calor, vapor ou energia tem representado de modo crescente uma alternativa, seja para a destinação dos resíduos urbanos como um todo, seja para os resíduos de plásticos (OLIVEIRA, 2012).

A técnica de reciclagem utilizada pela fábrica onde coletou-se o resíduo de GA, consiste no processo de reciclagem secundária. Onde, após o consumo dos garrafões de água até seu vencimento, eles são recolhidos por uma empresa de coleta seletiva do mesmo grupo, passando inicialmente por uma trituração, em seguida é encaminhado à extrusora, conforme ilustração (Figura 14), para a realização de moldagem por extrusão e após corte final é encaminhado à outra empresa de beneficiamento para fabricação de tampas de garrafas.

O processo de extrusão dos plásticos consiste basicamente em forçar a passagem (controlada) do material granulado por dentro de um cilindro aquecido, por meio de uma ou duas roscas “sem fim”, que transportam, misturam, compactam e permitem a retirada de gases liberados no processo (Abiplast, 2014)

Figura 14 – Processo de extrusão dos plásticos.

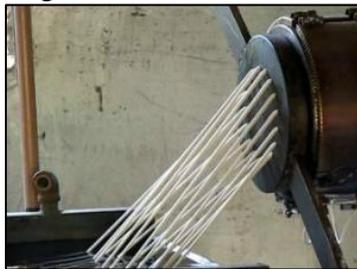


Fonte: ABIPLAST, 2014.

O material é depositado em um recipiente de alimentação, (funil), de onde é direcionado para dentro de um cilindro que contém um fuso (rosca) que o empurra, promovendo seu cisalhamento e homogeneização, contribuindo para sua plastificação. Esse cilindro possui resistências acopladas (na parte externa), que aquecem o material, ocasionando sua fusão. O material então percorre o cilindro até a outra extremidade. Na saída do cilindro, o material é comprimido contra uma matriz de perfil desejado, a qual dá formato ao produto, sendo este, depois, calibrado, resfriado, cortado ou enrolado. (Abiplast, 2014).

No caso da fábrica visitada, o material é beneficiado através de moldagem por extrusão, adquirindo forma de espaguete (Figura 15.a), sofrem resfriamento passando por um tanque com água, logo em seguida são triturados e recebem forma de grânulos (Figura 15.b), então, são embalados e comercializados para fabricação de novos produtos.

Figura 15 – Plástico reciclado. (a) Adquirindo forma de fios após extrusão; (b) Formato de grânulos.



(a)



(b)

Fonte: Setor Reciclagem, 2015; Recycling Today, 2016.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa subdivisão do trabalho, expõe-se os materiais/insumos utilizados para elaboração dos traços definidos nos estudos preliminares da pesquisa, bem como apresenta-se a metodologia empregada por cada ensaio executado para determinação das propriedades físicas e química (durabilidade) do resíduo de GA e das propriedades mecânicas dos compósitos.

#### 3.1 Materiais

Na produção dos compósitos foram utilizados microfibras comerciais de polipropileno e fibra reciclada de GA, como elemento de reforço, e matriz de concreto de cimento Portland. Como mistura de referência foi utilizado concreto com traço calculado para pavimento rígido, com o intuito de evidenciar as diferenças de desempenho das misturas com e sem reforço.

##### 3.1.1 Cimento

O cimento empregado foi o Portland composto com pozolana (CP II Z 32 – CIMENTO NASSAU<sup>®</sup>), disponível comercialmente na região metropolitana de Belém/PA. Dados referentes às propriedades físicas, químicas e mecânicas são ilustradas a seguir nas Tabelas 05, 06 e 07. A água utilizada foi obtida da rede de abastecimento da cidade citada.

Tabela 5 - Propriedades físicas do cimento.

Descrição	Propriedades Físicas			
	Und.	Obtido	Faixa de aceitação	
Ret. # 200	%	0,8	0,1 - 1,20	
Ret. # 325	%	7,3	6,50 - 10,00	
Área Específica	m <sup>2</sup> /kg	586	480,00 - 600,00	
Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	3,02	2,90 - 3,10	
Cons. Normal	%	33,4	≤ 35,00	
Tempo de Pega	Início	hh:mm	03:05	2:00 - 4:00
	Fim	hh:mm	04:25	4:00 - 5:00
Expansibilidade	Quente	mm	1	0,00 - 1,50

Fonte: Fabricante – Cimento Nassau<sup>®</sup>.

Tabela 6 - Propriedades químicas do cimento.

<b>Descrição</b>	<b>Obtido (%)</b>	<b>Faixa de aceitação (%)</b>
Perda ao Fogo	5,52	3,50 - 6,50
Dióxido de Silício	24,37	21,00 - 27,00
Óxido de Alumínio	9,07	7,00 - 11,00
Óxido de Ferro	3,48	3,00 - 4,00
Óxido de Cálcio	50,76	45,00 - 54,00
Óxido de Magnésio	2,74	2,00 - 4,00
Trióxido de Enxofre	2,33	2,00 - 3,50
Resíduo Insolúvel	16	9,00 - 16,00
Anidrido Carbono	1,71	1,00 - 5,00

Fonte: Fabricante – Cimento Nassau®.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do cimento.

<b>Resistência à Compressão</b>	
<b>Idade</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
3 dias	24,6
7 dias	37,2
28 dias	44,8

Fonte: Fabricante – Cimento Nassau®.

### 3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi proveniente de jazidas do município de Ourém/PA. Esta passou pelo processo de secagem ao ar livre em local abrigado para a realização da caracterização do material, conforme resultados apresentados nas Tabelas 08 e 09, bem como a Figura 16.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 08 é possível compreender o comportamento granulométrico do material estudado, ensaio realizado conforme NBR NM 248:2003, onde podemos extrair da tabela em questão as seguintes propriedades da amostra: Dimensão máxima característica igual a 4,76mm e módulo de finura igual a 2,38 de onde é possível caracterizar o agregado como areia média.

Tabela 8 - Determinação da composição granulométrica – Agregado miúdo.

Peneiras	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem acumulada (%)	Porcentagem que passa (%)
4,76	10,0	2,0	2,0	98,0
2	37,0	7,4	9,4	90,6
0,42	180,0	36,0	45,4	54,6
0,177	205,0	41,0	86,4	13,6
0,074	45,0	9,0	95,4	4,6
FUNDO	23,0	4,6	100	0,0

**Extração do agregado**

Massa da Amostra	500,00 g
Módulo de Finura	2,38

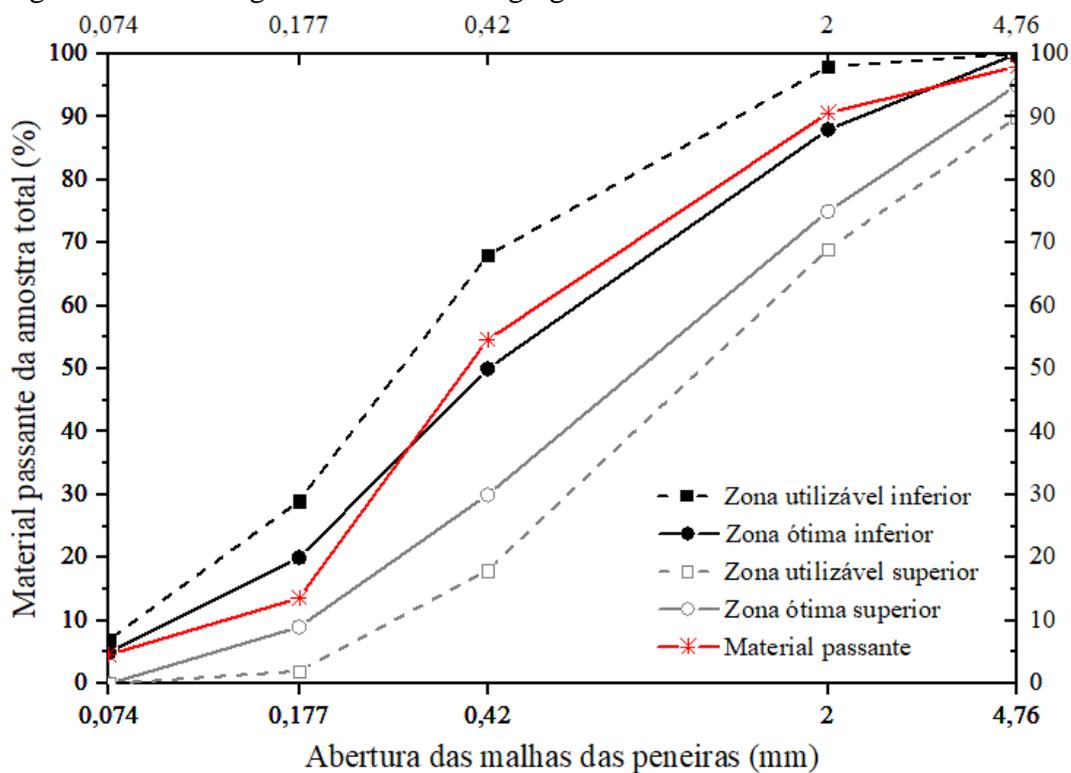
Fonte: Autor.

Tabela 9 - Características do agregado miúdo.

Descrição	Unidade	Obtido
Diâmetro máximo característico (NBR NM 248:2003)	mm	4,76
Módulo de finura (NBR NM 248:2003)	-	2,38
Massa específica (NBR NM 52P:2009)	kg/dm <sup>3</sup>	2,63
Teor de material pulverulento (NBR NM 46:2003)	%	2,5
Massa unitária (NBR NM 45:2006)	kg/dm <sup>3</sup>	1,53

Fonte: Autor.

Figura 16 - Ensaio granulométrico do agregado miúdo.



Fonte: Autor.

### 3.1.3 Agregado Graúdo

Como agregado graúdo foi utilizado o granito britado - brita nº1, proveniente de jazida situada em Tracuateua/PA. A brita ou seixo tem função essencial nas propriedades do concreto, por serem encarregados pelo aparecimento da zona de transição, que acordo com Mehta & Monteiro (2014) é o elo mais fraco da corrente, sendo considerada como fase limitante da resistência do concreto. Apesar do seixo ser de uso mais habitual em Belém por conta de sua disponibilidade, a brita foi escolhida por já fazer parte do traço padrão do pavimento e de qualquer forma se tem como justificativa o fato desse agregado apresentar textura mais áspera, que por sua vez, propicia a formação de uma aderência física mais forte entre a pasta de cimento e o agregado, havendo evidências que durante as primeiras idades, a resistência do concreto, particularmente a resistência à flexão, pode ser afetada pela textura do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Este agregado também passou pelo processo de secagem ao ar livre em local abrigado para a realização de sua caracterização, resultados apresentados a seguir, conforme Tabelas 10 e 11, bem como a Figura 17.

Tabela 10 - Determinação da composição granulométrica - Agregado graúdo.

Peneiras	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem acumulada (%)	Porcentagem que passa (%)
3"	0,0	0,0	0,0	100,0
1 1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	4,0	0,2	0,2	99,8
3/8"	2320,0	92,8	93,0	7,0
4	176,0	7,0	100,0	0,0
<b>Extração do agregado</b>				
Massa da Amostra		2500,00 g		
Módulo de Finura		6,93		

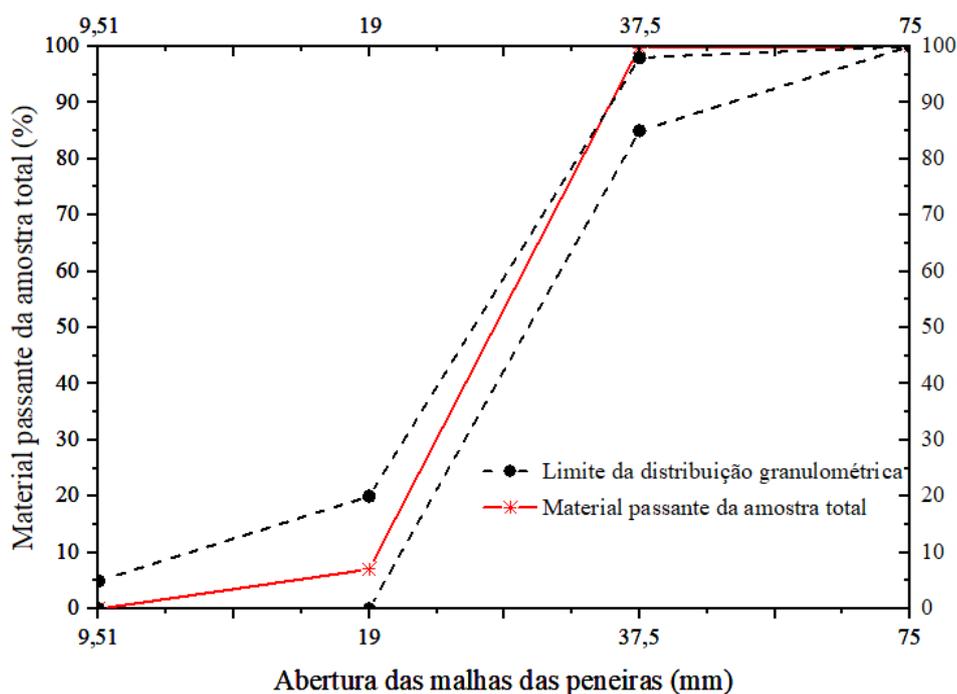
Fonte: Autor.

Tabela 11 - Características do agregado graúdo.

Descrição	Unidade	Obtido
Diâmetro máximo característico (NBR NM 248:2003)	mm	25
Módulo de finura (NBR NM 248:2003)	-	6,93
Massa específica (NBR NM 52:2009)	kg/dm <sup>3</sup>	2,65
Massa unitária (NBR NM 45:2006)	kg/dm <sup>3</sup>	1,54

Fonte: Autor.

Figura 17 - Ensaio granulométrico do agregado graúdo



Fonte: Autor.

### 3.1.4 Adição Mineral

O traço foi composto pela adição mineral sílica ativa - Propriedades apresentada na Tabela 12 - que de acordo com Mehta & Monteiro (2014) é um subproduto do processo de indução de fornos a arco nas indústrias de silício metálico ou das ligas de ferro-silício. No que se refere à ação química, esta pozolana reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), produzido durante a hidratação do cimento Portland. Como resultado, tem-se a produção de fases químicas com maior estabilidade e poder aglomerante, sendo os principais responsáveis pela resistência das pastas de cimento hidratadas, redução da porosidade e, portanto, maior resistência a corrosão química e diminuição na interface pasta/agregado.

Tabela 12 - Propriedades físico – química da sílica ativa.

Propriedades Físico-químicas	
Diâmetro médio	0,40 $\mu\text{m}$
Resíduo na peneira 45 $\mu\text{m}$	$\leq 10,0\%$
Aparência:	Pó de dimensões micrométricas
pH	$\leq 10,0$
Ponto de fusão	1550-1570 $^{\circ}\text{C}$
Densidade aparente	150 – 700 $\text{kg/m}^3$
Perda ao Fogo	$\leq 6\%$

Fonte: Fabricante–Tecnosil<sup>®</sup>.

### 3.1.5 Aditivos

Conforme Mehta & Monteiro (2014), aditivo/adição pode ser definido como qualquer material (com exceção de água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras) usado como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura. Mediante o traço piloto, os aditivos empregados foram dos tipos polifuncional e superplastificante, de acordo com exigência do traço utilizado para pavimento rígido, de maneira a ajustar a necessidade de fluidez do concreto sem modificar a relação água/cimento. A utilização dos dois aditivos se deu por questões de ordem técnica e econômica, em um processo de otimização da mistura considerando-se testes pilotos realizados. A seguir apresenta-se dados técnicos disponibilizados pelo fabricante (Tabela 13).

Tabela 13 - Dados técnicos dos aditivos.

<b>Aditivo</b>	<b>Marca</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Superplastificante	PowerFlow 1180 <sup>®</sup>	MC-Bauchemie <sup>®</sup>	1,09
Plastificante Polifuncional	Plastofluid PAV <sup>®</sup>	Erca <sup>®</sup>	1,08 - 1,12

Fonte: Fabricantes.

### 3.1.6 Fibra Comercial

A microfibras comerciais de polipropileno fez parte do traço original do concreto para pavimento rígido, desta forma esta foi utilizada para uma das etapas comparativas do estudo, chamada também de fibra de baixo módulo, pois conforme Figueiredo (2011) possuem módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido. É produzida a partir de multifilamentos indicada para o reforço de concretos e argamassas com a finalidade de gerar um composto homogêneo e controlar a fissuração por retração. As características físicas e mecânicas dessa fibra foram fornecidas pelo fabricante e estão presentes nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Propriedades físicas da fibra comercial.

<b>Propriedades Físicas</b>		
Diâmetro	$\mu\text{m}$	18
Seção		Circular
Comprimento	mm	24
Alongamento	%	80
Matéria-Prima		Polipropileno
Peso Específico	$\text{g/cm}^3$	0.91

Fonte: Fabricante.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas da fibra comercial.

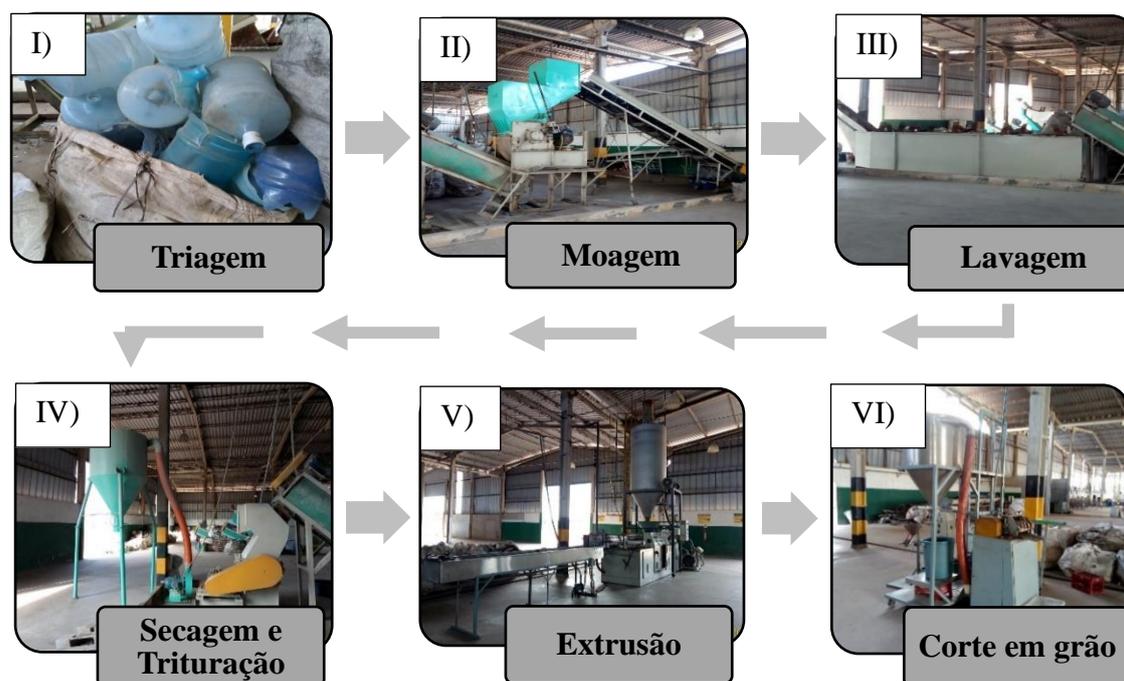
<b>Propriedades Mecânicas</b>		
Temperatura de Fusão	$^{\circ}\text{C}$	160
Temperatura de Ignição	$^{\circ}\text{C}$	365
Resistencia à Tração	MPa ( $\text{N/mm}^2$ )	300
Módulo de Elasticidade	GPa	3,0

Fonte: Fabricante.

### 3.1.7 Resíduo de Garrafão de Água (GA)

A fibra do rejeito de garrafão de água (GA), objeto de estudo como fibra alternativa, foi empregado na matriz de concreto com intuito de substituir a microfibras comerciais em uma outra etapa do estudo, sendo esta composta por resina de polipropileno. Oriunda de uma fábrica de reciclagem, onde os plásticos passaram por um processo de triagem (I), onde foram selecionados e separados os garrafões de água dos demais tipos de plásticos; moídos (II), para facilitar a passagem do material pelo interior dos equipamentos; lavados (III), a fim de eliminar de parte das impurezas contidas no material; secados e triturados (IV), com intuito de obter uma granulometria menor para que o material possa ser levado à etapa seguinte, somente após esse processo o material é encaminhado à extrusora (V), desta maneira ganham forma de monofilamentos e subsequentemente são cortados em formato de grãos pequenos (VI), com a intenção de seguir para fabricação de outros objetos. Conforme descrito, gerou-se ilustrativamente estas etapas de acordo com a Figura 18. O resíduo utilizado foi coletado após a fase de extrusão em monofilamentos, pois na etapa de corte de grãos, na maioria das vezes são misturados com outros tipos de plásticos. Então, o resíduo de GA monofilado foi cortado manualmente para que adquirisse o comprimento desejado para a realização do estudo (Figura 19). A caracterização do resíduo seguiu procedimentos descritos no subitem 3.2.1.

Figura 18 - Processo de obtenção do resíduo de GA.



Fonte: Autor.

Figura 19 - Resíduo de garrafão de água. a) Forma de monofilamentos; b) Forma triturada (comprimento de 5 cm).

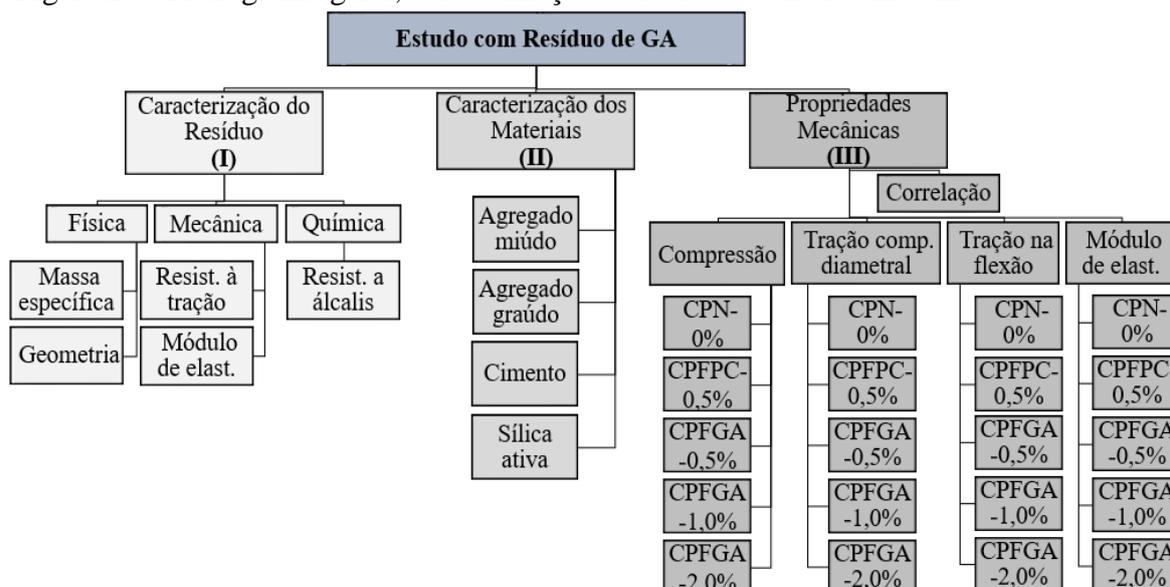


Fonte: Autor.

### 3.2 Métodos

Com intuito de esquematizar de forma mais ampla a metodologia a ser utilizada nesta pesquisa a Figura 20 ilustra o fluxograma que abrange as caracterizações dos materiais, sendo, as caracterizações do resíduo (I), caracterização dos materiais (II) e a investigação das propriedades mecânicas dos concretos (III).

Figura 20 - Fluxograma geral, caracterização do resíduo e ensaios mecânicos.



Fonte: Autor.

Para melhor compreensão deste estudo, a parte experimental foi dividida em 3 etapas, de modo a facilitar a visualização do que será de suma importância para esta pesquisa. Em cada etapa apresenta-se os procedimentos devidos e seus respectivos objetivos, ilustrando também de forma detalhada a metodologia que será utilizada para os ensaios tecnológicos.

### 3.2.1 1ª Etapa: Caracterização dos Materiais

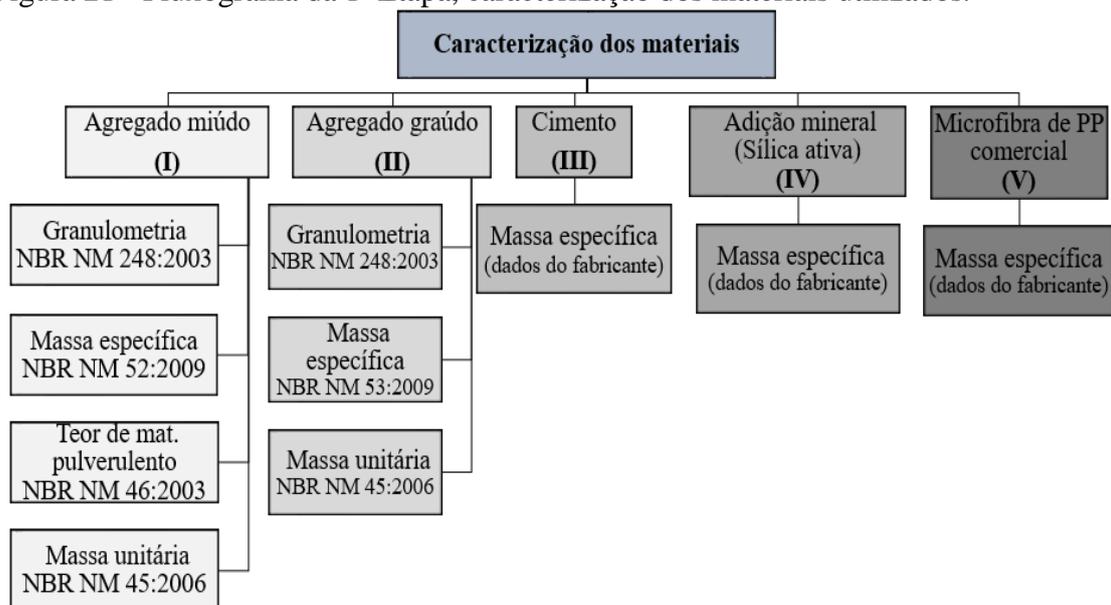
Nesta etapa o fluxograma da Figura 21 apresenta a caracterização física dos materiais, bem como dos agregados miúdos (I), agregados graúdos (II), cimento (III), adição mineral – sílica ativa (IV) e da microfibras comerciais (V).

Para caracterização das propriedades físicas dos agregados miúdos, os ensaios executados foram: Granulometria, massa específica, teor de material pulverulento e massa unitária, conforme normas indicadas no fluxograma.

No que tange a caracterização das propriedades físicas dos agregados graúdos, os ensaios realizados se deram através de: Granulometria, massa específica e massa unitária, conforme normas indicadas no fluxograma.

Ademais, para caracterização do cimento, sílica ativa e microfibras comerciais foram utilizados dados de massa específica fornecidos pelo fabricante, conforme Tabelas 5, 12 e 14, respectivamente.

Figura 21 - Fluxograma da 1ª Etapa, caracterização dos materiais utilizados.



Fonte: Autor.

### 3.2.2 2ª Etapa: Caracterização do Resíduo

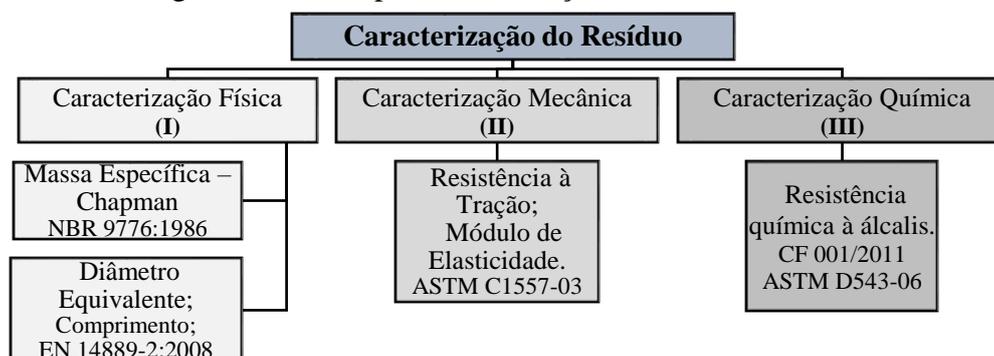
A segunda etapa é ilustrada abaixo de acordo com a Figura 22, trazendo consigo caracterização física (I), mecânica (II) e química (III) do resíduo de garrafão de água mineral.

Na caracterização física os ensaios realizados foram: Massa específica, diâmetro equivalente e comprimento, conforme normas contidas no fluxograma da Figura 22.

Para o aspecto mecânico, realizou-se: Ensaio de resistência a tração e módulo de elasticidade, de acordo com norma ASTM C1557-03.

O tocante ao estudo/caracterização química, foi realizado ensaio de resistência química à álcalis, conforme procedimento técnico sugerido pela Associação Nacional de Pisos e Revestimento de Alto Desempenho – ANAPRE.

Figura 22 - Fluxograma da 2ª Etapa, caracterização do resíduo de GA.



Fonte: Autor.

- Determinação das propriedades físicas do resíduo de garrafão de água (GA)

- Massa Específica

A massa específica da fibra de GA foi medida através do frasco de Chapman (NBR 9776:1986). As fibras foram cortadas para facilitar a inserção destas no interior do frasco, e secas em estufas até constância de massa. Foram introduzidos 50 g de fibras de GA secas no frasco com água e o conjunto foi agitado cuidadosamente para eliminação de bolhas de ar que poderiam existir, após descanso da solução foi realizado a leitura no frasco. Pela equação 01, obtém-se a massa específica da fibra.

$$\mu = \frac{mf}{L - 200} \quad (01)$$

Onde,

$\mu$  = representa a massa específica (g/cm<sup>3</sup>);

$mf$  = representa a massa da fibra seca (g);

L = representa a leitura no frasco de Chapman (cm<sup>3</sup>).

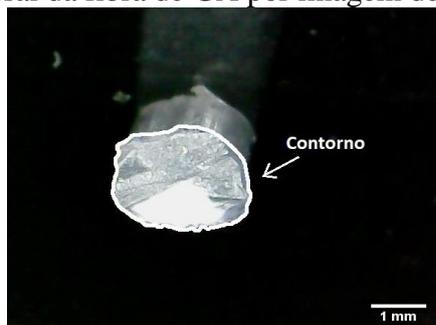
- Geometria do resíduo de GA (fibra alternativa)

Para determinação da área da seção transversal das fibras alternativas de GA, foram utilizados dois métodos. Um deles foi através do uso do paquímetro digital (Figura 24b), pois como não há norma brasileira para caracterização geométrica de fibras sintéticas, o ensaio foi realizado com embasamento na norma europeia EN14889-2:2008, que trata especificamente de macrofibras poliméricas. Para medir o diâmetro da fibra alternativa, utilizou-se um paquímetro de 0,01 mm de precisão. Para cada fibra, dentre 10 amostras, calculou o diâmetro equivalente a partir de três medidas em posições axiais e ortogonais convenientemente espaçadas (um em cada extremidade e um no centro), com a obtenção do diâmetro equivalente ( $D_e$ ), calculou a área da seção transversal da fibra, considerando sua geometria circular. No entanto, esse método tem pouca precisão, pois há variação entre os diâmetros medidos ao longo do comprimento das fibras alternativas de GA, além do fato de que esta não tem a sua seção transversal perfeitamente circular. Além disso, ao usar esse método, é preciso ter cautela para não pressionar em excesso a fibra com o paquímetro, podendo assim, gerar um resultado impreciso.

O outro método usado para medir a área da seção transversal das fibras foi baseado nas imagens obtidas através de um microscópio digital HD Color CMOS aliado com o programa computacional (ImageJ<sup>®</sup>), onde através da imagem capturada do microscópio

adquiriu-se as dimensões do elemento estudado (Figura 23). Seccionou-se uma pequena parte da fibra de GA para visualização de sua seção transversal no microscópio e em seguida contornou o perímetro desta, para que assim fosse gerado a dimensão de sua área transversal. Neste segundo método utilizado é verificado uma maior precisão de medidas, haja vista que, há uma ampliação da imagem para que seja melhor reconhecida a área de seção da fibra de garrafão de água.

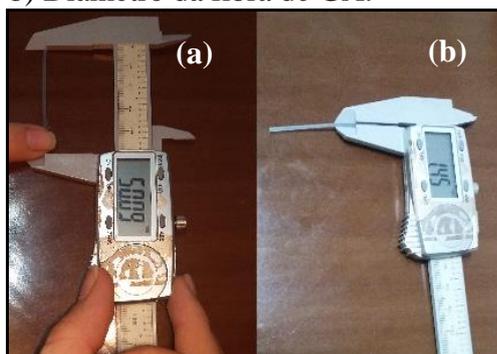
Figura 23 – Seção transversal da fibra de GA por imagem de microscópio eletrônico.



Fonte: Autor.

Os comprimentos das fibras de GA foram medidos também através do paquímetro (Figura 24a). Para obtenção desta, foram colhidas 10 amostras cortadas manualmente dos monofilamentos inteiros gerados após a extrusão da fábrica de reciclagem.

Figura 24 – Ensaio de caracterização realizado com paquímetro. (a) Comprimento da fibra de GA; b) Diâmetro da fibra de GA.



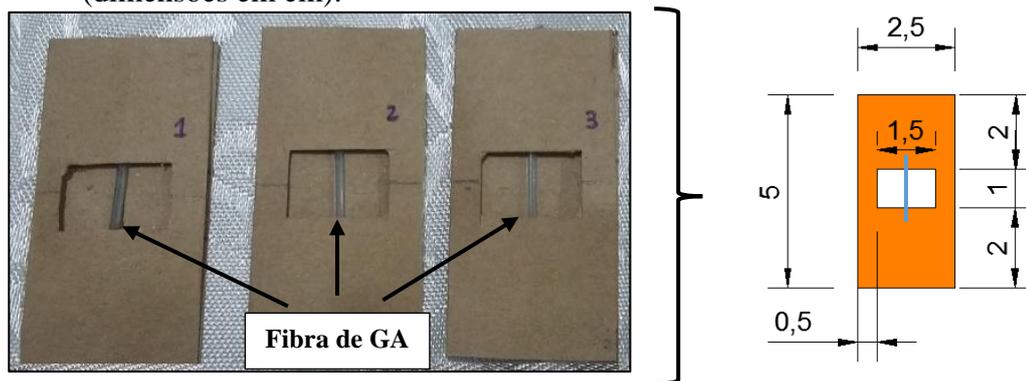
Fonte: Autor.

- Determinação da propriedade mecânica do resíduo de garrafão de água (GA)
  - Resistência à tração

Na eventualidade de não haver normalização nacional para ensaios mecânicos em fibras sintéticas, adotou-se orientações da norma ASTM C1557:2014 para determinação de

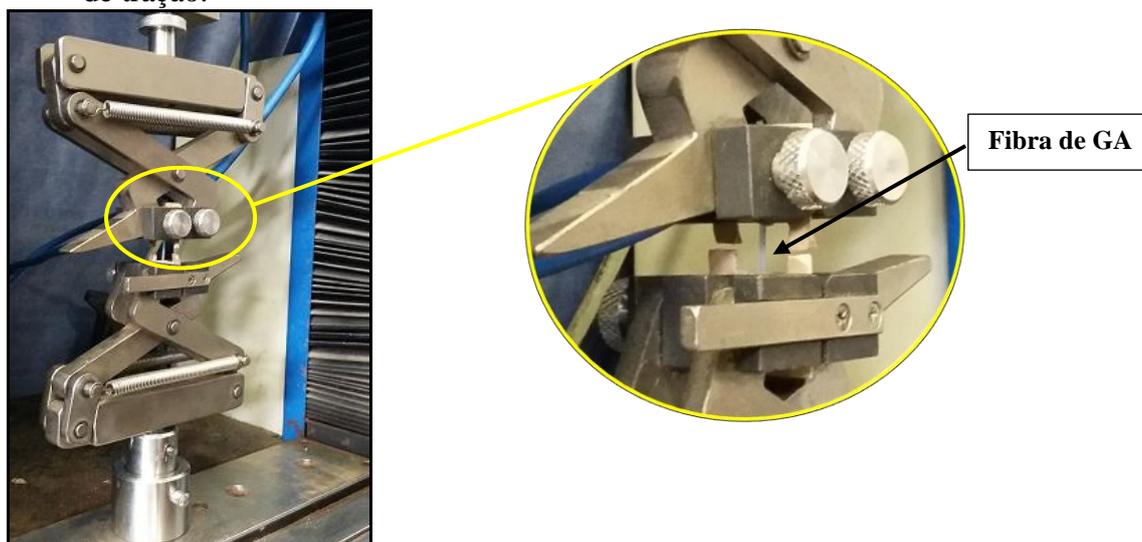
resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra de GA, haja vista que, a norma citada traz como metodologia estes mesmos ensaios mecânicos para fibras de carbono, vidro e outro tipos, logo, tomou-se esta como parâmetro para o ensaio. Nesse método, a fibra individual é inserida a uma moldura confeccionada com uma folha de papel *kraft* (Figura 25), onde existe um orifício locado no centro do molde. Esse procedimento foi escolhido tendo como referência a norma ASTM C1557:2014. O orifício, a princípio, serviria também para determinação do diâmetro, porém levando em consideração a grande variabilidade de diâmetro ao longo da fibra de GA, o que traz maior imprecisão ao resultado do teste, foi realizado a conferência de seus diâmetros/áreas de seção transversal conforme método descrito no item de caracterização geométrica das fibras de GA antes das amostras serem fixadas nos moldes. Em seguida a fibra foi colada na moldura, tomando-se o cuidado de utilizar um comprimento aderido que promovesse uma ancoragem suficiente, assegurando que somente seriam transmitidos, ao segmento livre, esforços de tração. Após a fixação da fibra de GA, o conjunto foi fixado às garras da máquina, em seguida, os moldes foram seccionados nas laterais (Figura 25), para que a carga de tração aplicada atuasse exclusivamente na fibra. A máquina utilizada para esse ensaio foi uma EMIC/Linha DL (Figura 26), com velocidade de aplicação de carga de 0,5mm/min.

Figura 25 – Exemplo com três amostras preparadas para ensaio de resistência à tração (dimensões em cm).



Fonte: Autor.

Figura 26 – Amostra posicionada com corte nas laterais para início do ensaio em máquina de tração.



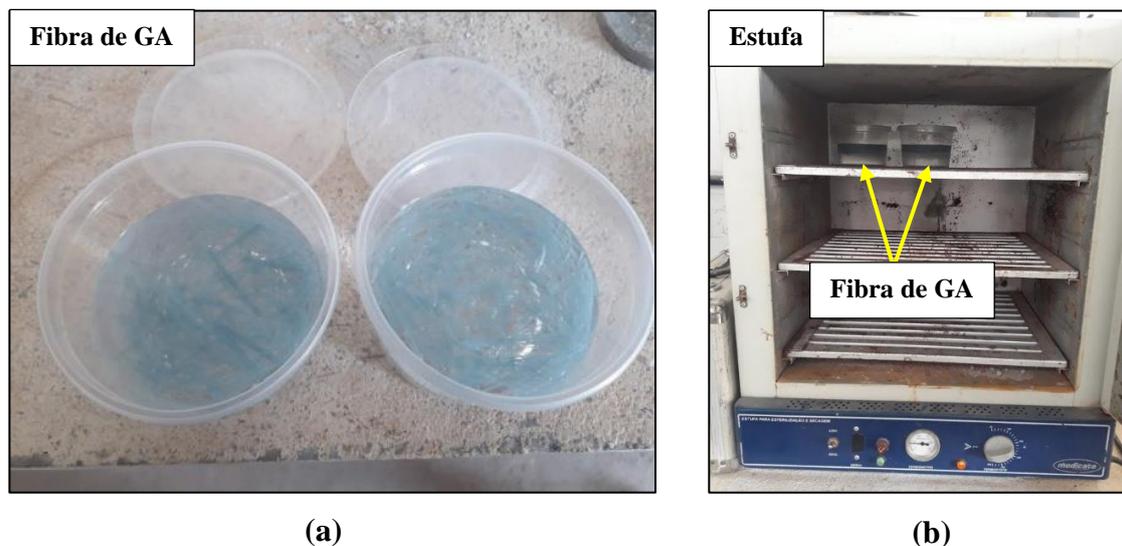
Fonte: Autor.

- Determinação de resistência química das fibras do resíduo de garrafão de água (GA)
  - Resistência Química ao Ataque de Álcalis (Durabilidade)

Na ausência de normalização de ensaios à resistência química à álcalis de fibras sintéticas, foi adotada a recomendação do comitê técnico de concreto reforçado com fibras da ANAPRE, uma vez que, esta trouxe como parâmetro normas internacionais para elaboração do procedimento CF 001/2011. Imergiu-se 10g de fibra de resíduo de GA em 300g de solução de hidróxido de sódio (NaOH) com a proporção de 40g de NaOH para 1L de água (Figura 27a). Após preparadas as amostras, vedou-se o recipiente e durante 30 dias foi estocado em estufa a 60°C (Figura 27b). Passado o tempo determinado a fibra de GA foi retirada da solução com auxílio de uma bagueta, funil e filtro de papel, lavada em água corrente para retirar todo o excesso da solução remanescente e secada em estufa durante 4 horas. Depois das fibras de GA totalmente secas registrou-se sua nova massa em balança. Foram realizadas duas amostras para obtenção de um resultado médio.

O Procedimento da ANAPRE descreve como critério de aceitação da fibra, que a massa média obtida após o ensaio deve ser superior a 98,0% da massa inicial, ou seja, admite-se perda de massa de até 2,00%. Além disso, deve-se analisar a superfície da amostra, checando se houve algum tipo de degradação devido ao ataque dos agentes químicos.

Figura 27 – Amostras para ensaio de resistência ao ataque de álcalis. a) Fibras de GA imersas em solução de hidróxido de sódio; b) Amostras na estufa.



Fonte: Autor.

### 3.2.3 3ª Etapa: Ensaios Tecnológicos

- Produção dos corpos de prova

Com o andamento de grandes obras de infraestrutura na região Metropolitana de Belém/ PA, houve a implantação de pavimento rígido para delimitação de via expressa para tráfego do BRT (Bus Rapid Transit), onde foi utilizado a tecnologia de concreto reforçado com fibras (CRF) para controle de fissuração, mais especificadamente, foi incorporada a microfibras comerciais de polipropileno (Figura 29). Desta forma utilizou-se o traço deste pavimento em concreto como referência para o estudo em questão.

Figura 28 – Amostra de microfibras de polipropileno



Fonte: Autor

O planejamento experimental foi desenvolvido para avaliar a possibilidade de se produzir um concreto para pavimento rígido reforçado com fibra de resíduo de GA, com intuito de possibilitar o estabelecimento de comparações entre os resultados obtidos para 3 cenários divergentes, tendo como primeiro cenário o concreto para pavimento reforçado com microfibras comerciais de polipropileno (traço referência), o segundo, utilizamos o mesmo traço para a realização do concreto, porém não foi empregado qualquer tipo de adições com fibras, e o terceiro e último cenário, foi executado o mesmo traço referência, entretanto, substituindo a microfibras comerciais pelas fibras de resíduos de GA com diferentes proporções.

Com relação ao traço da mistura, o mesmo possui resistência característica  $F_{ct,k} = 5,0\text{MPa}$  e  $f_{ck} = 50\text{MPa}$ , sendo que os cenários adotado para o estudo mantiveram na íntegra padrões de traço, inclusive relação água/cimento, e também, tipos de ensaios já adotados em trabalhos anteriores com compósitos de concreto reforçado com fibras sintéticas. Esses trabalhos (Lucena, 2017; Hesami, et al., 2016; Yin, et al., 2015) adotaram metodologias de produção e testes dos compósitos bastante semelhantes. Desse modo, os compósitos estudados foram confeccionados com traço unitário 1: 2,36: 3,33: 0,42 (cimento, areia, brita, relação a/c), utilizando adições de sílica ativa e aditivos, conforme Tabela com traço em massa por metro cúbico de concreto produzido (Tabela 16).

Tabela 16 - Traço e material utilizado para ensaios

Traço	Relação a/c (kg/kg)	Abatimento (mm)	Quantidade de insumo por m <sup>3</sup> de concreto						
			Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Sílica (kg)	Água (l)	Aditivos (l) S.P. <sup>a)</sup> P.L. <sup>b)</sup>	
TR	0,42	60+-20	330	778	1100	16,5	140	2,00	3,80

<sup>a)</sup> S.P – Aditivo Superplastificante

<sup>b)</sup> P.L – Aditivo Polifuncional

Fonte: Autor

Com relação as frações volumétricas de fibra de GA, os teores variaram de 0%, 0,5%, 1% e 2% de adição, sendo respectivamente, 0 kg, 0,502kg, 1,01kg e 2,04kg por metro cúbico de concreto. Percentuais definidos a partir de revisões bibliográficas e massas calculadas de acordo com a equação 02. Ademais, foi utilizada a microfibras comerciais de polipropileno (existente no traço referência) para efeito comparativo de resultados, adotando o teor de adição conforme orientação do fabricante, com fração volumétrica de 0,5% (0,6Kg por metro cúbico de concreto).

$$V_f = \frac{\left(\frac{m_f}{\mu_f}\right)}{\left(\frac{m_c}{\mu_c}\right) + \left(\frac{m_a}{\mu_a}\right) + \left(\frac{m_b}{\mu_b}\right) + \left(\frac{m_{H_2O}}{\mu_{H_2O}}\right) + \left(\frac{m_f}{\mu_f}\right)} \quad (02)$$

Onde,

$V_f$  = Fração volumétrica da fibra (%);

$m_c$  = Massa do cimento (g);

$\mu_c$  = Massa específica do cimento (g/cm<sup>3</sup>);

$m_a$  = Massa da areia (g);

$\mu_a$  = Massa específica da areia (g/cm<sup>3</sup>);

$m_b$  = Massa da brita (g);

$\mu_b$  = Massa específica da brita (g/cm<sup>3</sup>);

$m_{H_2O}$  = Massa da água (g);

$\mu_{H_2O}$  = Massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>);

$m_f$  = Massa da fibra (g);

$\mu_f$  = Massa específica da fibra (g/cm<sup>3</sup>).

Tendo em vista que, o cimento utilizado para o estudo foi o CP II Z 32 e este adquire maiores resistências em idades mais avançadas, foram adotados para a realização dos ensaios 28, 56 e 84 dias, afim de acompanhar a evolução no tempo do desempenho mecânico do concreto.

Para cada etapa desenvolvida nesta pesquisa, foram produzidos 36 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm, sendo 12 para o ensaio de resistência à compressão axial, 12 para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral e 12 para o ensaio de módulo de elasticidade. Já para o ensaio de resistência à tração na flexão foram executados 9 corpos de prova prismáticos com dimensão 15x15x50 cm, também para cada etapa executada. Gerando um total de 180 corpos de prova cilíndrico e 45 prismáticos. Sendo estes todos confeccionados em formas metálicas (Figura 29).

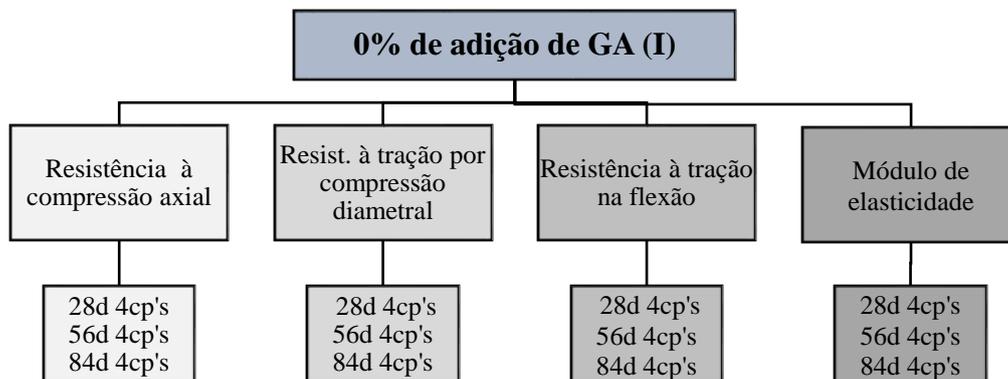
Figura 29 – Corpos de prova cilíndricos e prismáticos moldados em formas metálicas.



Fonte: Autor.

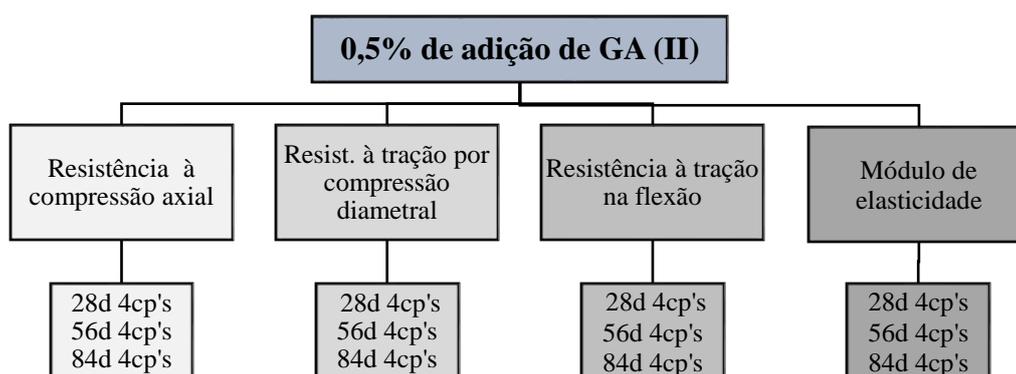
Para uma melhor compreensão as Figuras 30 a 34 representam o esquema de produção com as quantidades de corpos de prova produzidos por ensaio realizado para cada fração volumétrica de resíduo de GA utilizado, adição com 0% de GA (I), adição com 0,5% de GA (II), adição com 1% de GA (III) e adição com 2% de GA (IV). Sendo que para cada adição foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.

Figura 30- Fluxograma dos ensaios mecânicos com 0% de adição de resíduo.



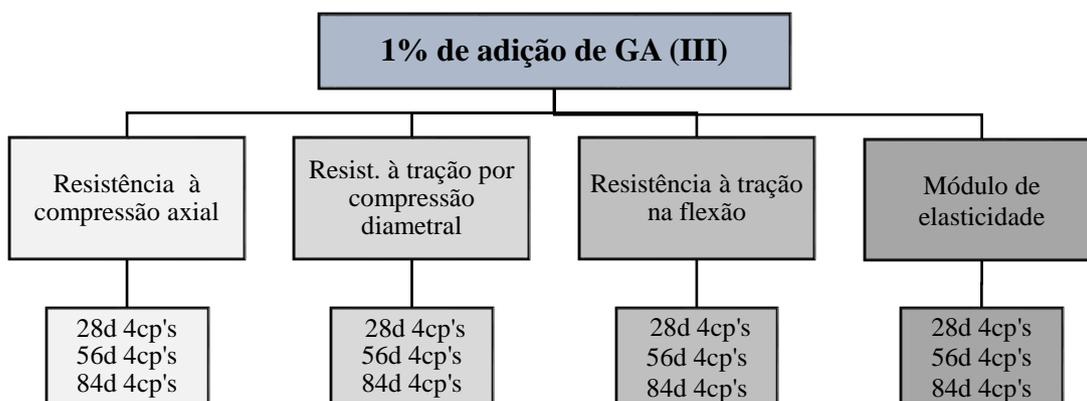
Fonte: Autor.

Figura 31 - Fluxograma dos ensaios mecânicos com 0,5% de adição de resíduo.



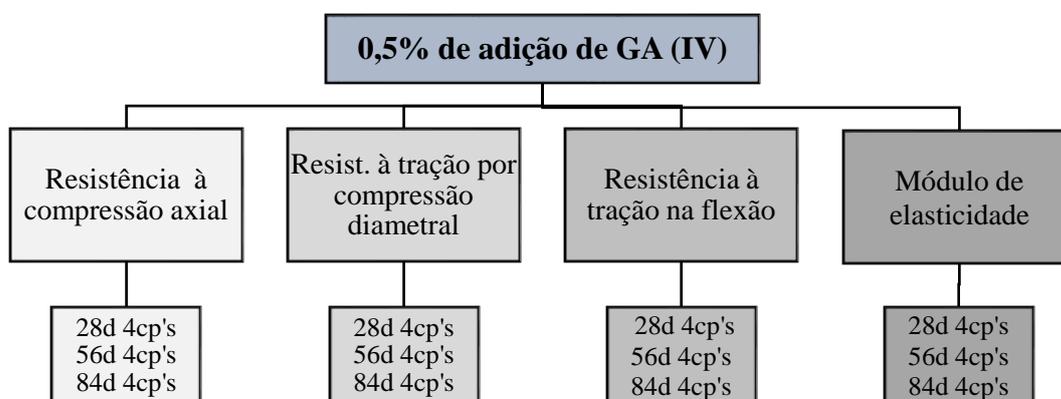
Fonte: Autor.

Figura 32 - Fluxograma dos ensaios mecânicos com 1% de adição de resíduo.



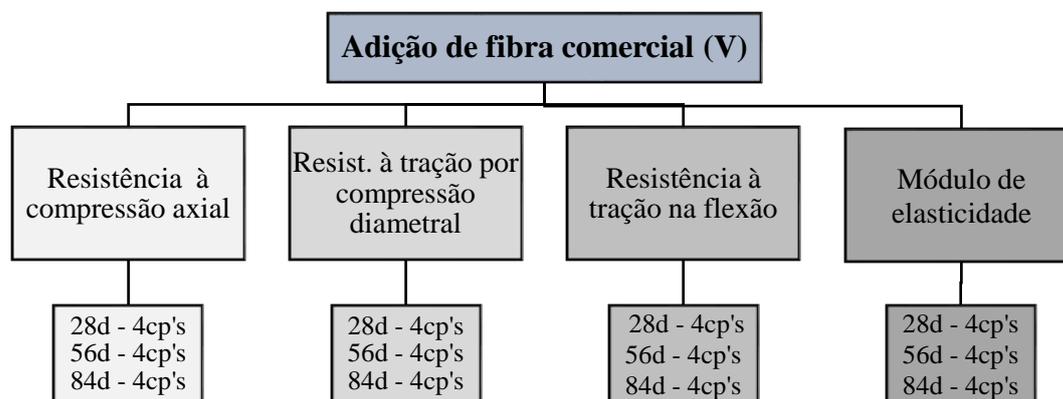
Fonte: Autor.

Figura 33 - Fluxograma da 3ª Etapa, ensaios mecânicos com 2% de adição de resíduo.



Fonte: Autor.

Figura 34 - Fluxograma da 3ª Etapa, ensaios mecânicos com adição de fibra comercial.



Fonte: Autor.

Inicialmente, antes da mistura e confecção dos corpos de prova, os agregados miúdos e graúdos foram secos ao ar livre. As fibras de GA que foram coletadas diretamente na fábrica em monofilamentos longos, foram cortadas em comprimentos iguais a 50 mm, pois conforme Figueiredo (2011) é recomendado a utilização de fibras cujo o comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo usado no concreto.

Para execução das betonadas os materiais empregados assim que preparados foram levados à uma betoneira com capacidade de 500 L para realização da mistura. Primeiramente a betoneira foi umedecida e deixada escorrer toda a água excedente, em seguida foram adicionados a brita, parte da água de amassamento, cimento, areia, sílica e o restante da água juntamente com o polifuncional foram inseridos aos poucos, após isso, foi adicionado o superplastificante, por fim, as fibras iam sendo inseridas durante o funcionamento da betoneira, deixando assim um ciclo médio de 15 a 20 minutos até que a homogeneização total da mistura estivesse acontecido.

Os corpos de prova cilíndricos e prismáticos de concreto foram moldados de acordo com ABNT NBR 5738:2015, com dimensões básicas 100x200mm e 150x150x500mm, respectivamente, adensados sob processo vibratório, uma vez que, trata-se de concreto classe S50 com abatimento entre  $50 \leq a < 100$  mm. A desforma aconteceu para os corpos de prova cilíndricos após 24 horas e para os prismáticos após 48 horas, houve a identificação das amostras e imersão destas em um tanque de água com a adição de cal para o processo de cura. Os corpos de prova foram retirados da água dois dias antes da realização dos ensaios, para propiciar a secagem dos mesmos.

As denominações dos corpos de prova do programa experimental são apresentadas na Tabela 17. As seguintes abreviações foram usadas para representar o tipo e fração volumétrica das fibras na mistura:

- Letras iniciais: CP (Corpo de prova)
- A partir da terceira letra: Tipo das fibras  
N: nenhuma  
FPC: Microfibra de polipropileno comercial  
FGA: Fibra reciclada de garrafão de água.
- Porcentagem após o hífen: Fração volumétrica da fibra

Tabela 17 - Traço e material utilizado para ensaios.

Abreviação	Traço unitário	Tipo de fibra	Fibra/m <sup>3</sup> (kg)	Comprimento (mm)
CPN-0%	1: 2,36: 3,33: 0,42	-	-	-
CPFPC-0,5%	1: 2,36: 3,33: 0,42	Microfibra de polipropileno comercial	0,600	24
CPFGA-0,5%	1: 2,36: 3,33: 0,42	Resíduo de GA	0,502	50
CPFGA-1,0%	1: 2,36: 3,33: 0,42	Resíduo de GA	1,010	50
CPFGA-2,0%	1: 2,36: 3,33: 0,42	Resíduo de GA	2,040	50

Fonte: Autor.

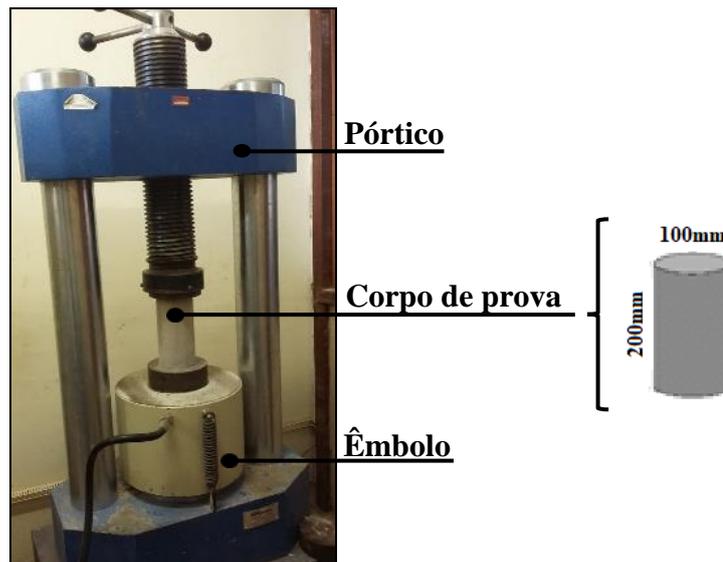
### 3.3 Propriedades mecânicas do compósito

#### 3.3.1 Resistência à Compressão Axial

Este ensaio seguiu a prescrição normativa ABNT NBR 5739: 2007, que determina a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Foram ensaiados todos os tipos de compósitos moldados, com e sem fibras, a fim de obter as relações que compunham os materiais estudados.

Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina da marca EMIC, utilizando uma célula de carga com capacidade de carga de 2000 quilonewton (kN), com velocidade de carregamento de  $0,25 \pm 0,05$  MPa/s (Figura 35)

Figura 35 - Ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Autor.

Conforme a norma acima citada, a resistência à compressão do corpo de prova deve ser calculada pela equação seguinte:

$$f_c = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (03)$$

Onde,

$f_c$  = Resistência à compressão, em Megapascal (MPa);

$F$  = Carga máxima alcançada, em Newton (N);

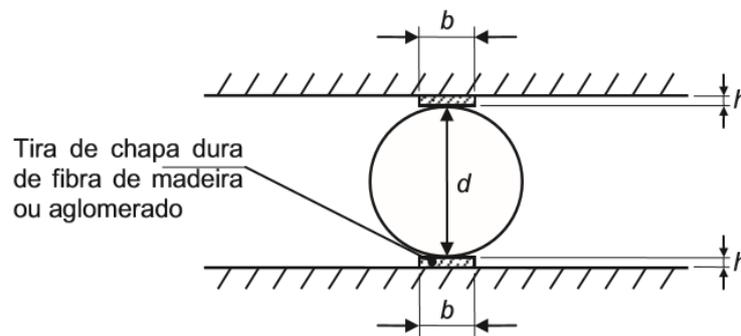
$d$  = Diâmetro do corpo de prova, em milímetro (mm).

### 3.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

É o ensaio mais utilizado e também conhecido internacionalmente como Ensaio Brasileiro. Foi desenvolvido por Lobo Carneiro, em 1943 (PINHEIRO, 2007).

Ensaio realizado conforme prescrição da norma ABNT NBR 7222: 2011 que determina a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova e testemunhos cilíndricos de concreto e argamassa (Figura 36), este ensaio se fez necessário por se tratar de um concreto destinado a pavimento rígido.

Figura 36 - Disposição do corpo de prova para ensaio de compressão diametral.



**Legenda**

$b = (0,15 \pm 0,01) \text{ mm}$

$h = (3,5 \pm 0,5) \text{ mm}$

Fonte: ABNT NBR 7222:2011.

A resistência à tração por compressão diametral deve ser calculada pela expressão:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (04)$$

Onde,

$f_{ct,sp}$  = Resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos (MPa);

F= Força máxima obtida no ensaio (N);

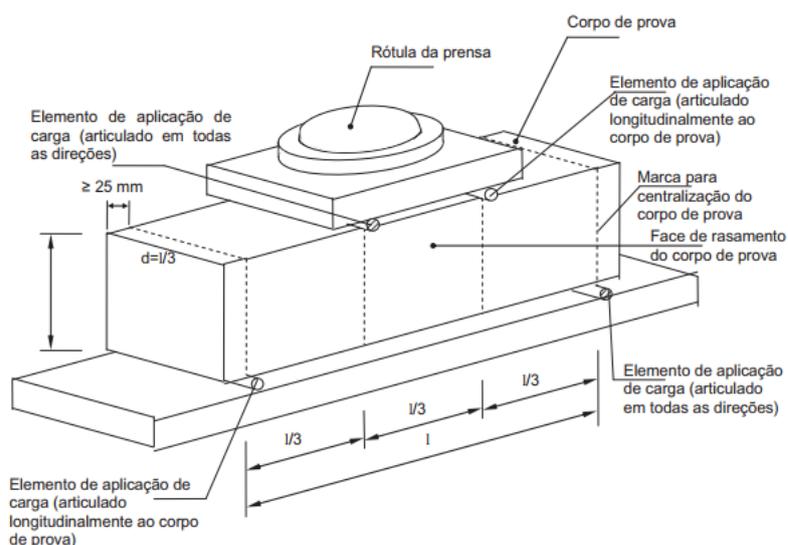
d = Diâmetro do corpo de prova (mm);

l= Comprimento do corpo de prova (mm).

### 3.3.3 Resistência à Tração na Flexão

Para caracterização quanto à resistência à tração por flexão os procedimentos adotados foram regidos pela ABNT NBR 12142: 2010. Esta norma emprega o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão, conforme ilustra a Figura 37.

Figura 37 - Disposição do corpo de prova em perspectiva para ensaio de tração na flexão.



Fonte: ABNT NBR 12142: 2010.

A resistência à tração na flexão deve ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$f_{ct,f} = \frac{Fl}{bd^2} \quad (05)$$

Onde,

$f_{ct,f}$  = Resistência à tração na flexão (MPa);

F = Força máxima obtida no ensaio (N);

l = Dimensão do vão entre apoios (mm);

b = Largura média do corpo de prova (mm).

### 3.3.4 Análise da Tenacidade

O melhor desempenho do concreto reforçado com fibras quanto comparado ao concreto convencional vem da melhor capacidade de absorver energia durante a fratura. A ruptura da matriz do concreto sem a presença de fibras ocorre de forma frágil, ou seja, o seu comportamento é caracterizado pela rápida propagação das fissuras (resposta pré-pico). Já no caso do concreto reforçado com fibras, a sua ruptura é caracterizada quando a matriz

suporta esforços após a sua fissuração, o que ajuda manter a integridade estrutural e de coesão no material (resposta pós-pico) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Muitos ensaios podem ser aplicados para caracterização da tenacidade dos compósitos tais como tração, compressão, impacto e flexão. O ensaio de flexão é mais utilizado, pois o mesmo apresenta mais verdadeiramente as condições de muitas situações práticas e é mais fácil de ser realizado que o ensaio de tração (PICANÇO, 2005).

Arif (2014) diz que, a maioria das técnicas para avaliar a tenacidade adotam corpos de prova prismáticos e acontecem a partir do ensaio de flexão. A Tabela 18 apresenta os métodos para realização deste ensaio.

Tabela 18 – Métodos de ensaio para determinação da tenacidade.

<b>Norma ou recomendação</b>	<b>Forma do C.P.</b>	<b>Dimensões do C.P. (mm)</b>	<b>Parâmetros monitorados</b>	<b>Medida da tenacidade</b>
Norma americana ASTM C1550 ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )	Painel circular	D=800 h=75	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Relação entre a energia absorvida para valores solicitados da deflexão central
Norma japonesa JSCE SF-4 ( <i>Japan Society of Civil Engineers</i> )	Prisma	b= 100 ou 150 h= 100 ou 150 L= 300 ou 450 c= 380 ou 500	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Energia absorvida até uma deflexão equivalente a L/150. Fator de tenacidade para uma deflexão equivalente a L/150.
Norma europeia EFNARC ( <i>European Federation of Producers and Percialist Products for Structures</i> )	Prisma	b= 125 h= 175 L= 450 c= 600	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Resistência residual para valores de deflexão de 0,5mm a 4mm
	Placa	b= 600 h= 100 L= 500 x 500 c= 600	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Energia absorvida até uma deflexão de 25mm
FIB 2010 ( <i>Fédération Internationale Du Béton</i> )	Prisma	b= 150 h= 150 L= 500 c= 550	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Limite de proporcionalidade (LOP). Resistência residual para valores de abertura de fissura de 0,5, 1,5, 2,5, 3,5mm
ASTM C1609 ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )	Prisma	b= 150 h= 150 L= 450 c= 500	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Resistência de pico, resistências residuais para valores de deflexão de L/600 e L/150

b= largura do C.P. D= altura do C.P. L= Vão livre entre cutelos c= Comprimento do C.P. D= diâmetro do C.P.

Fonte: Arif (2014).

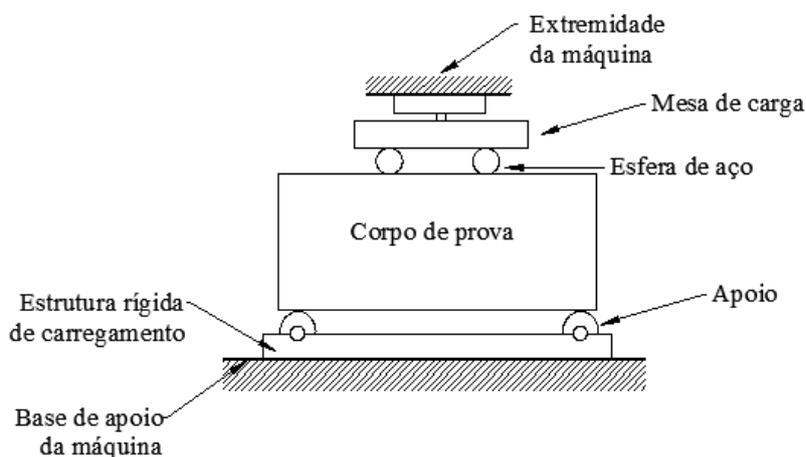
Esta pesquisa adotou (parcialmente) o método de ensaio para determinação da tenacidade a Norma ASTM C1609:2010, uma vez que, esta é apropriada para corpos de prova prismáticos com dimensões de 150x150x500mm e de acordo com esta norma a largura e altura do corpo de prova devem ser maiores que 3 vezes o comprimento da fibra, neste caso esta medida deve variar entre 50 a 75mm para as fibras.

Ensaio de tenacidade, e as respectivas recomendações da ASTM C1609:2010 foram previamente utilizados por diferentes autores na literatura (ARIF, 2014; LUCENA, 2017). Então, como no presente trabalho estuda-se fibras de GA com 50mm e corpos de prova para ensaio de flexão de 150x150x500mm, as recomendações da mesma foram parcialmente adotadas durante a pesquisa, dadas limitações experimentais do laboratório.

No tocante dessa adaptação realizada no ensaio de tenacidade, a pesquisa realizada por Amaral Junior, Silva e Moravia (2017), foi utilizada também como procedimento, uma vez que, o valor da tenacidade pode ser obtido calculando a área formada pela curva carga (kN)-deslocamento (mm) e o eixo das abscissas. O cálculo da tenacidade dos materiais estudados por esses autores citado acima, foi realizado utilizando a curva gerada no ensaio de resistência à tração na flexão e para calcular a área gerada por ela foi escolhido um método de integração numérica realizado pelo programa computacional OriginPro®.

Diante do exposto, empregou-se para o traçado da curva carga-deslocamento o deslocamento da mesa de carga (Figura 38) constituída pelo programa da máquina de ensaio de resistência à tração na flexão, ao contrário do mencionado pela norma americana ASTM C1609:2010, que sugere o emprego de um LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear), ou seja, um transdutor para medição de deslocamento linear.

Figura 38 – Esquema do ensaio de tenacidade – Adaptado.



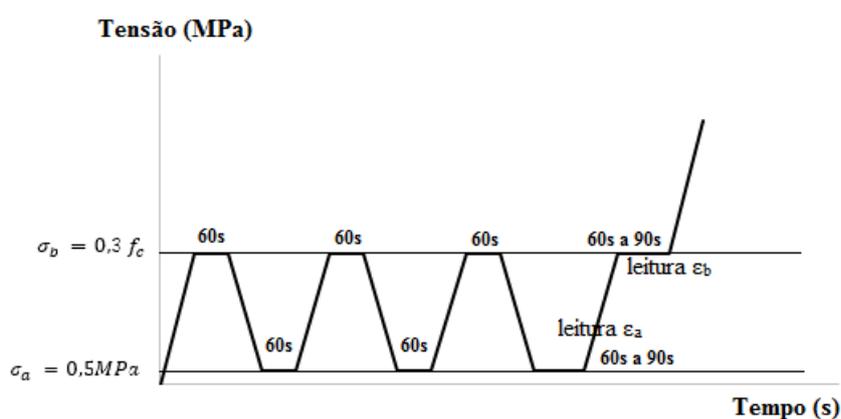
Fonte: Autor.

Essa alteração experimental foi adotada por limitações laboratoriais, uma vez que durante a realização dos ensaios, o LVDT que foi previamente testado e utilizado em ensaios pilotos apresentou-se mecanicamente danificado.

### 3.3.5 Módulo de Elasticidade

Os resultados foram obtidos através do ensaio estático que de acordo com a norma ABNT NBR 8522: 2017 prevê a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial -  $E_{ci}$ . Para esta determinação os corpos de prova cilíndricos são inicialmente posicionados no centro da prensa, submetidos primeiramente ao processo de escorvação, ou seja, três carregamentos e descarregamentos sucessivos até o limite de  $0,3 \times f_c$  (força de compressão), quando então são anotadas as medidas de deformação. Posteriormente estes corpos de prova são carregados até a sua ruptura, conforme demonstrado na Figura 39. No anexo A - Informativo, da norma citada acima, prevê a determinação do módulo secante a qualquer tensão especificada entre  $0,2 \times f_c$  e  $0,8 \times f_c$ , sem escorvação prévia do corpo de prova, simulando assim as deformações que o concreto de uma estrutura sofre em seu primeiro carregamento (PACHECO, *et al.* 2014). Não obstante, para este estudo foi considerado o módulo de deformabilidade tangencial ( $E_{ci}$ ), desta forma, há a necessidade dos três ciclos iniciais de carregamento e descarregamento.

Figura 39 - Plano para obtenção direta do módulo de deformação tangente inicial.



Fonte: ABNT NBR 8522.

De acordo com Pacheco et al. (2014) é importante lembrar ainda que, mesmo com a padronização dos procedimentos de ensaios e a modernização dos equipamentos de medição,

pequenos descuidos na preparação dos corpos de prova e execução destes ensaios podem gerar prejuízos irreversíveis aos resultados a serem obtidos. Fator esse que motivou Montija (2007), pois a elevada variabilidade de resultados experimentais observada pelo meio técnico nacional em ensaios interlaboratoriais, cujo resultados indicam desvios-padrão totais da ordem de 3,5 GPa, valor significativo para o controle tecnológico de obras de construção civil. Para Bittencourt et al. (2014) a variabilidade da resistência de um concreto na condição de preparo do grupo B (concreto produzido no canteiro segundo ABNT NBR 12655: 2006) mostram que estes desvios são de 5,8GPa a 6,3GPa, o que significa uma variabilidade expressa pelo coeficiente de variação da ordem de 10% a 15%.

### 3.4 Microscopia das fibras e dos compósitos com fibras de GA

Foi verificado o estado das fibras de GA após ensaios de tração em microscópio eletrônico no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), em equipamento de marca Leica, modelo M80 com câmera acoplada de modelo MC170HD. Em escala milimétrica, as imagens do microscópio óptico proporcionaram uma perfeita observação do estado final da fibra de GA após o compósito ser submetido ao ensaio de tração.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em equipamento de marca Hitachi, modelo TM 3000, a fim de verificar a interação fibra x matriz, visando obter informações qualitativas de uma amostra retirada de um corpo de prova prismático que foi submetido ao ensaio de tração.

A preparação das amostras para observação por microscopia foi feita, cortando-se o material em tamanhos convenientes (Figura 40) e recobrando suas superfícies de fratura por deposição de camada fina de ouro, evaporadas em vácuo.

Figura 40 – Amostras para ensaio de microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Autor.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O presente capítulo apresenta os principais resultados, bem como as discussões das informações obtidas durante os experimentos.

### **4.1 Propriedades do Resíduo**

Neste item expõe-se os resultados experimentais alcançados pelos ensaios de caracterização física mecânica e química do resíduo de GA.

#### **4.1.1 Características Geométricas das Fibras de Resíduo**

Apresenta-se nessa parte do trabalho os resultados referentes à caracterização geométrica das fibras de resíduo.

Pode ser observado, na Tabela 19, que as medidas das áreas da fibra de GA, realizadas através do microscópio, como também do paquímetro digital, resultaram em valores relativamente diferentes, com o paquímetro, obteve-se um valor médio cerca de 10% inferior àquele obtido com o microscópio. Dos inconvenientes já descritos a respeito do método que utiliza o paquímetro, pode-se concluir que o valor determinado pelo processo óptico (microscópio) tende a apresentar uma maior precisão, haja vista que, com o microscópio conseguimos delinear a real seção da fibra de GA para obtenção de sua área. Com relação ao coeficiente de variação ser relativamente alto para ambos os métodos utilizados, conclui-se pelo fato das amostras ensaiadas, assim como todo material do garrafão de água colhido para o estudo, não apresentarem constância na forma geométrica de suas seções transversais do resíduo, tendo em conta que trata-se de resíduo gerado após extrusão em fábrica de reciclagem, não passando por qualquer processo de beneficiamento destinado a comercialização do rejeito para tal finalidade específica (fibras para reforço de concreto).

Os valores de comprimentos obtidos, não apresentaram grandes variações, pelo fato das fibras terem sido cortadas manualmente em comprimento pré-determinado (50mm).

Tabela 19 – Diâmetro, área da seção transversal e comprimento das fibras de GA.

	Resíduo de GA				Comprimento (mm)
	Paquímetro		Microscópio		
	De (mm)	Área da seção (mm <sup>2</sup> )	D médio (mm)	Área da seção (mm <sup>2</sup> )	
<b>Média</b>	1,52	1,88	1,64	2,10	49,21
<b>DP</b>	0,27	0,67	0,30	0,81	0,83
<b>CV (%)</b>	18	36	18	39	2
<b>Máx.</b>	2,08	3,40	2,26	4,02	50,31
<b>Mín.</b>	1,04	0,85	1,23	1,19	47,94

Fonte: Autor.

De acordo com a norma EN 14889-2:2008 o resíduo apresenta classificação como Classe II (Macro fibras > 0,30 mm de diâmetro) e conforme os limites de tolerância de desvio de valor individual e desvio de valor médio, seriam respectivamente para o comprimento, +/-10% e +/-5%; para o diâmetro equivalente, +/-50% e +/-5%. Porém, como trata-se de um resíduo, não se tem valores nominais de diâmetro equivalente para realização de comparativos. No entanto, para o comprimento é possível a análise, uma vez que, foi adotado comprimento de 50mm por conta do diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado no traço do experimento. Com isso, o resíduo cortado manualmente ficou dentro dos parâmetros de tolerância da norma EN 14882-2:2008, com 100% das amostras do limite de tolerância para desvio de valor individual dentro do aceitável e com limite de tolerância para desvio médio de 2%, que também atende os requisitos normativos.

Cáceres (2016), realizou pesquisa similar com a utilização de macrofibras comerciais, caracterizou geometricamente as fibras pelo método do paquímetro e imagem digital, desta forma ao aplicar os critérios de tolerância dimensionais da norma EN 14882-2, para um dos tipos de macrofibras utilizado pelo autor, observou que 15% das macrofibras tiveram um dos diâmetros individuais com valor maior a +/-50%, tendo como parâmetro os resultados obtidos com paquímetro, para os valores apresentados pelo ensaio de imagem digital este valor reduziu para 3%. Enquanto que, o diâmetro médio se apresentou dentro da tolerância de +/-5%, levando em consideração os valores com paquímetro, entretanto, para os resultados com imagem digital, o diâmetro médio encontrou-se fora da tolerância de +/-5%. Em relação ao fator de forma individual, para o ensaio com paquímetro, 37% das macrofibras apresentaram valores excedente ao limite de +/-50%, porem para o ensaio de imagem digital as amostras ficaram dentro do limite. Enquanto que, os valores médios apresentaram resultados acima da tolerância de +/-10%, para ambos os ensaios. Por fim, o comprimento

médio se mostrou dentro da tolerância de  $\pm 5\%$  para ambos os ensaios. O autor concluiu que, somente o comprimento das macrofibras foram consideradas em conformidade com os limites definidos pela norma EN 14882-2, tanto para os valores obtidos pelo ensaio com paquímetro, quanto para análise com imagem digital.

#### 4.1.2 Caracterização Mecânica do Resíduo

Expõe-se nessa parte da pesquisa os resultados referentes à caracterização mecânica de resíduo de GA, sendo apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de elasticidade.

- *Resistência à Tração*

Conforme previsto, ao longo do carregamento, à medida que houve um acréscimo de tensão, observou-se um alongamento do resíduo antecedente à ruptura, enfatizando que na grande maioria das amostras não houve o rompimento do material, e sim, somente a perda de seção na zona tracionada, fato este ocorrido por conta da estrutura química apresentada pelos polímeros, como mostrado no item 2.3.1 da revisão bibliográfica apresentada.

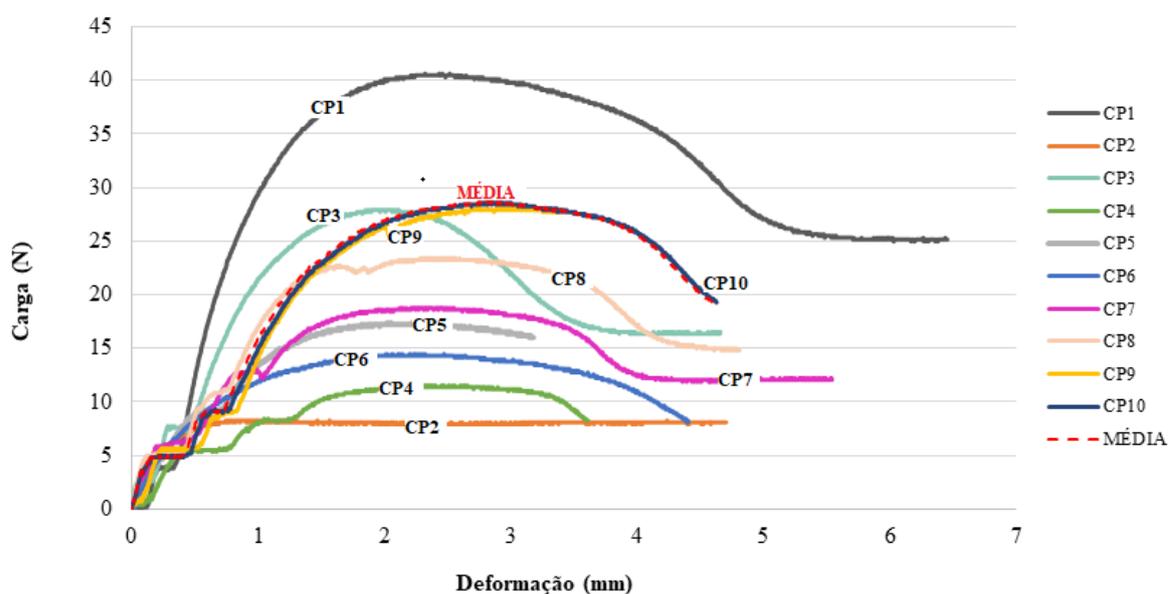
Os ensaios de resistência à tração nas fibras de GA mostraram valores dessa propriedade muito variáveis, tendo em média 10,75MPa. O gráfico abaixo (Figura 41) ilustra o desempenho das amostras do resíduo em curvas individuais de carga versus deslocamento, podendo verificar que todas as amostras apresentaram um comportamento dúctil. Exibindo, portanto, uma fase no gráfico muito similar ao escoamento do aço. Fator este que contribuiu para que o resíduo não fraturasse bruscamente. A Tabela 20 exibe os dados médios de cargas suportadas pelas amostras ensaiadas, bem como o valor de carga máxima e mínimo.

Ao realizar o comparativo da resistência à tração do valor médio de tensão do resíduo e da microfibras comercial (Tabela 15), o primeiro se mostra aproximadamente 27 vezes menor que a segunda. No entanto, uma possibilidade para essa variação apresentada se dá primeiramente por estarmos tratando de um resíduo, onde a resistência baixa pode ser produto de supostas falhas na superfície do material.

Estudos com análise de resistência à tração com macrofibras comerciais também apontam valores superiores ao do resíduo de GA. Cáceres (2016), estudou dois tipos de macrofibras de polipropileno “A” e “B”, sendo que a fibra tipo “A”, a maior tensão foi obtida com a área a partir do diâmetro pelo paquímetro, a tensão foi de  $562,28 \pm 78,38$ MPa.

Naturalmente, isto ocorre porque, como foi explanado nessa pesquisa, o paquímetro subestima o diâmetro da fibra e a área da seção transversal, o que implica numa superestimação da tensão calculada. O menor valor obtido foi de  $376,66 \pm 72,35\text{MPa}$ , determinado a partir da área pelo método das imagens digitais. Em relação a macrofibra do tipo “B” as tensões obtidas a partir da área determinada pelo método do paquímetro, foi de  $817,25 \pm 31,42\text{MPa}$ . Pelas imagens digitais, a tensão diminuiu para  $660,28 \pm 79,75\text{MPa}$ .

Figura 41 – Curva carga x deslocamento das amostras de resíduo de GA.



Fonte: Autor.

Tabela 20 – Resultado de carga média suportada no ensaio de resistência à tração da fibra resíduo de GA.

<b>Carga Média Obtidas no Ensaio de Resistência à Tração (N)</b>	
<b>Média</b>	21,90
<b>DP</b>	9,44
<b>CV (%)</b>	43,10%
<b>Nº</b>	10
<b>Máx.</b>	40,64
<b>Mín.</b>	8,26

Fonte: Autor.

- *Módulo de Elasticidade*

Para a determinação do módulo de elasticidade foram utilizadas às curvas de tensão por deformação, explanadas anteriormente. Para esse fim, traçou-se uma reta tangente a região linear da curva.

Cáceres (2016) utilizou como parâmetro tensões correspondentes a 5% e 30% da tensão máxima para traçar a linha tangente, e assim, obter do módulo de elasticidade neste intervalo.

Para este estudo foi utilizado o intervalo de 5% e 25%, haja vista que, de acordo com Cáceres (2016), 5% é o limite inferior que se evita a região de acomodação inicial do ensaio. Para o limite superior jogou-se apropriado 25% da tensão máxima, pelo fato de que, acima dessa porcentagem para algumas amostras a reta traçada ultrapassaria a fase linear da curva, portanto, estaria fora da região elástica do material.

A Tabela 21 apresenta o resultado do módulo de elasticidade do resíduo do garrafão de água, calculado a partir da média das amostras ensaiadas. Apresentando também, desvio padrão, valor máximo e mínimo obtido.

Tabela 21 – Módulo de elasticidade da fibra do resíduo de GA.

<b>Módulo de Elasticidade – E (valores expressos em GPa)</b>	
<b>Média</b>	4,12
<b>DP</b>	1,2
<b>CV (%)</b>	34,71%
<b>Nº</b>	10
<b>Máx.</b>	7,26
<b>Mín.</b>	2,27

Fonte: Autor.

Ao realizar o comparativo do módulo de elasticidade resultante do rejeito de GA com o da microfibras comercial (Tabela 15), verifica-se que o resíduo apresentou um maior módulo de elasticidade com relação a microfibras.

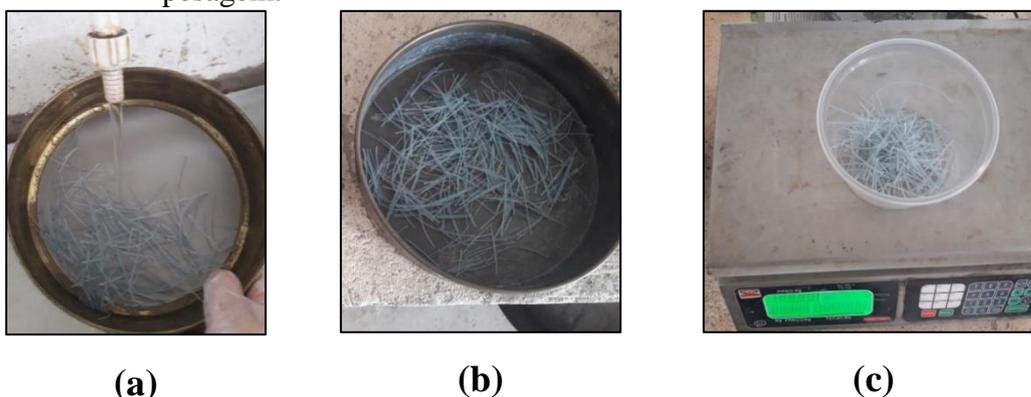
Da mesma forma, ocorreu com as macrofibras de PP estudadas por Cáceres (2016), na qual apresentaram módulo de elasticidade para a fibra tipo “A”, 3,42GPa, e para fibra tipo “B”, 3,62GPa.

#### 4.1.3 Resistência Química ao Ataque de Álcalis (Durabilidade)

Após os 30 dias passados, as amostras da fibra de GA foram retiradas da estufa, lavadas, secadas e pesadas para registrar a massa perdida das amostras durante o processo do ensaio, conforme Figura 42, verificou-se após pesagem que não houve diminuição de massa, desta forma, mantiveram-se as amostras com 100% de sua massa inicial.

Esse ensaio é realizado de forma acelerada quanto comparado às condições normais de utilização da fibra dentro da matriz cimentícias, uma vez que, conforme dados fornecidos pelo fabricante do cimento utilizado para a pesquisa, o pH da pasta de cimento varia entre 12 a 14 enquanto a solução onde as fibras de GA ficaram imersas chegou a valores da ordem de 13,38, conforme Figura 43, mostrando a capacidade da mesma em resistir naturalmente ao meio alcalino. Não somente isso, mas também, de forma tátil/visual foi observado que as amostras de fibra de GA não apresentaram degradação da matéria após o ensaio.

Figura 42 – Amostras retiradas da estufa após 30 dias. (a) lavagem, (b) secagem; (c) pesagem.



Fonte: Autor.

Figura 43 – Ensaio de pH da solução após 30 dias de ensaio



Fonte: Autor.

## 4.2 Propriedades mecânicas do compósito

Nessa seção do trabalho apresenta-se os principais resultados obtidos durante os experimentos, no tocante às propriedades mecânicas, iniciando-se pelos dados obtidos no estudo de caracterização mecânica para a determinação da resistência à compressão axial.

### 4.2.1 Ensaio de Compressão Axial

Os resultados obtidos para as idades de 28, 56 e 84 dias, apresenta-se respectivamente nas Tabelas 22, 23 e 24. Informando média das resistências das amostras ensaiadas, desvio padrão, tensão máxima e mínima.

Tabela 22 - Resistência à compressão axial – 28 dias.

<b>Ensaio de Resistência à Compressão Axial - MPa</b>					
<b>28 dias</b>					
<b>Amostras</b>	<b>CPN-0%</b>	<b>CPFPC-0,5%</b>	<b>CPFGA-0,5%</b>	<b>CPFGA-1,0%</b>	<b>CPFGA-2,0%</b>
<b>Média</b>	63,36	63,28	65,21	66,57	74,77
<b>DP</b>	3,76	3,57	2,84	6,62	1,49
<b>CV (%)</b>	5,93%	5,64%	4,36%	9,94%	1,99%
<b>Nº</b>	3	3	3	3	3
<b>Máx.</b>	67,51	68,78	67,77	75,92	75,83
<b>Mín.</b>	60,16	56,1	62,16	61,65	73,72

Fonte: Autor.

As resistências à compressão simples aos 28 dias expostas acima, adquiriram ganho de resistência com o aumento das frações volumétricas do resíduo. Em comparação das amostras com microfibras (CPFPC) e resíduo de GA de 0,5%, 1% e 2% com relação aos corpos de prova com 0% de adição, tem-se respectivamente um acréscimo de resistência de 0%, 3%, 5% e 18%. Demonstrando uma certa constância entre as amostras de 0% e CPFPC e um pequeno crescimento para a família de 0,5%, porém não tão expressivo. Entretanto, as famílias com adição em 1% e 2% de resíduo trouxeram resultados significativos.

Tabela 23 – Resistência à compressão axial – 56 dias.

<b>Ensaio de Resistência à Compressão Axial - MPa</b>					
<b>56 dias</b>					
<b>Amostras</b>	<b>CPN-0%</b>	<b>CPFPC-0,5%</b>	<b>CPFGA-0,5%</b>	<b>CPFGA-1,0%</b>	<b>CPFGA-2,0%</b>
<b>Média</b>	64,99	66,39	70,65	71,73	75,91
<b>DP</b>	0,3	3,89	3,89	3,52	2,51
<b>CV (%)</b>	0,46%	5,86%	5,51%	4,91%	3,31%
<b>Nº</b>	3	3	3	3	3
<b>Máx.</b>	65,3	70,09	75,15	74,9	78,72
<b>Mín.</b>	64,71	62,33	68,41	67,94	73,88

Fonte: Autor.

Para a idade de 56 dias (Tabela 23), também há o acréscimo de resistência com o aumento de adição de resíduo. Correlacionando os resultados das famílias CPFPC, 0,5%, 1% e 2% com a amostra de 0%, obtém-se na ordem percentuais de crescimento de 2%, 9%, 10% e 17%. Verificando-se um acréscimo gradativo de todas as famílias com relação a matriz sem reforço.

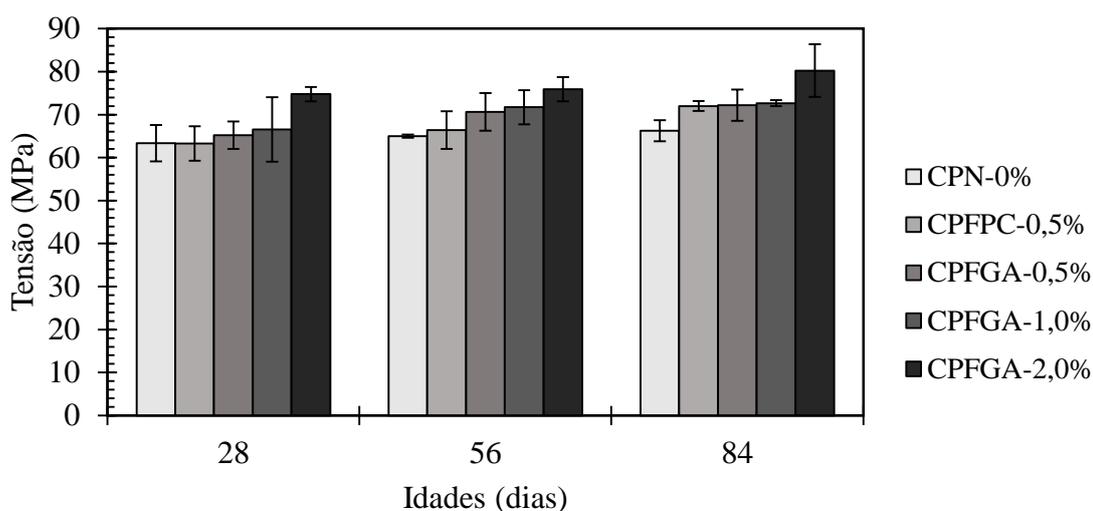
Tabela 24 – Resistência à compressão axial – 84 dias.

<b>Ensaio de Resistência à Compressão Axial - MPa</b>					
<b>84 dias</b>					
<b>Amostras</b>	<b>CPN-0%</b>	<b>CPFPC-0,5%</b>	<b>CPFGA-0,5%</b>	<b>CPFGA-1,0%</b>	<b>CPFGA-2,0%</b>
<b>Média</b>	66,24	72	72,18	72,67	80,25
<b>DP</b>	2,16	1	3,22	0,64	5,4
<b>CV (%)</b>	3,26%	1,39%	4,46%	0,88%	6,73%
<b>Nº</b>	3	3	3	3	3
<b>Máx.</b>	67,77	73	74,46	73,12	84,07
<b>Mín.</b>	64,71	71	69,9	72,22	76,43

Fonte: Autor.

Por fim, para a idade de 84 dias todas as amostras obtiveram resultados bastante consideráveis (Tabela 24), com relação a amostra de 0% em adição.

Figura 44 - Resistência a compressão axial para idades de 28, 56 e 84 dias.



Fonte: Autor.

De acordo com os resultados acima apresentados (Figura 44), fica nítido o crescimento da resistência à compressão axial das famílias com adição de microfibras comerciais e resíduo de GA com relação a família de 0% em adição. Enfatizando que o cimento utilizado para a elaboração do traço foi o CP-II Z 32, que adquire ganho de resistência com idades mais avançadas, por se tratar de cimento com adição pozolânica. Porém se fez notório os acréscimos sofridos pelas amostras com adição de resíduo de GA, podendo ser explicado através de micro rugosidade apresentada pelo resíduo de GA, conforme imagem da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apresentada no item 4.3 (Figura 53), podendo ter contribuído para uma maior aderência do compósito com os acréscimos das frações volumétricas dos resíduos. Não somente isso, mas também, por se tratar de um polímero, o resíduo de GA pode ter contribuído para o controle de exsudação, logo, por reter parte da água que poderia evaporar, o processo de cura interna das amostras, podem ter apresentado melhorias por conta da água aprisionada internamente.

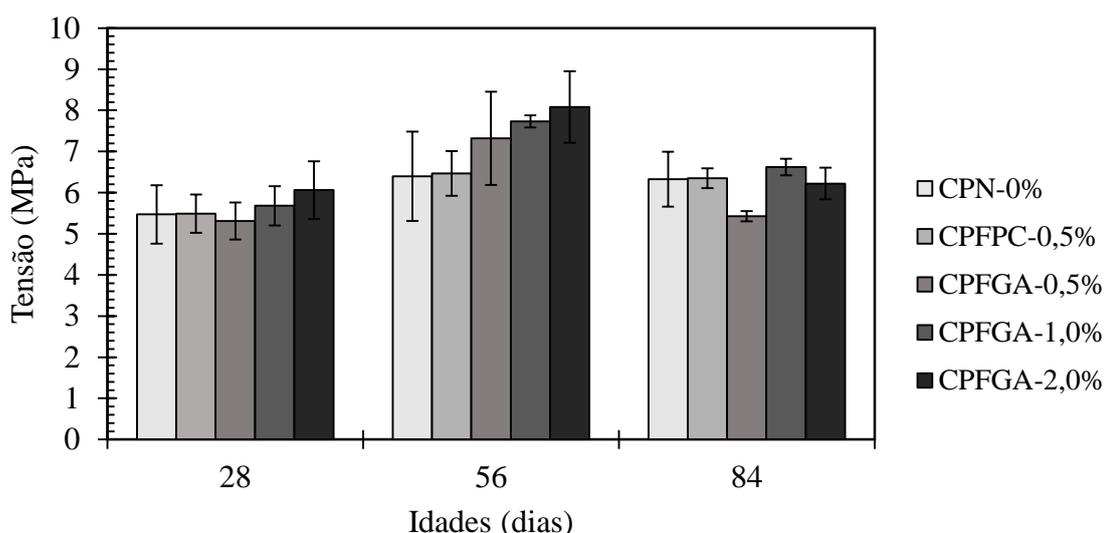
No estudo sobre o comportamento ao cisalhamento de vigas I reforçadas com fibras de polipropileno de Al-Shather et al. (2017), a resistência à compressão para amostras de 28 dias foi incrementada de forma proporcional ao aumento da quantidade de fibras no concreto. A média da resistência máxima compressiva foi de 25,6 (sem fibra), 27,5, 28,2, 29, 29,5, 31,7 e 33,1MPa, respectivamente, correspondendo a uma fração volumétrica de fibras de 0,0%, 0,2%, 0,3%, 0,4%, 0,5%, 0,55% e 0,6%. O aumento na resistência à compressão foi de cerca de 7,42%, 10,15%, 13,28%, 15,23%, 23,82% e 29,3%, respectivamente, do concreto simples.

Amaral Junior, Silva e Moravia (2017), apresentaram uma variação não muito significativa entre o concreto sem fibras e com o incremento da fibra de PP. No concreto sem adição de fibras (concreto convencional) obteve-se um valor médio para resistência à compressão de 25,1MPa. Comparativamente, no concreto com adição de fibras de PP a média obtida foi de 26,0MPa, representando um acréscimo médio de 3,6%. Portanto não houve influência da adição de fibras de PP na resistência à compressão do concreto.

#### 4.2.2 Ensaio de Tração na Compressão Axial

Obtidas as cargas de ruptura sob tração indireta, foram calculadas as resistências médias à tração dos materiais ensaiados, que se encontram ilustradas na Figura 45.

Figura 45 - Resistência à tração na compressão axial para idades de 28, 56 e 84 dias.



Fonte: Autor.

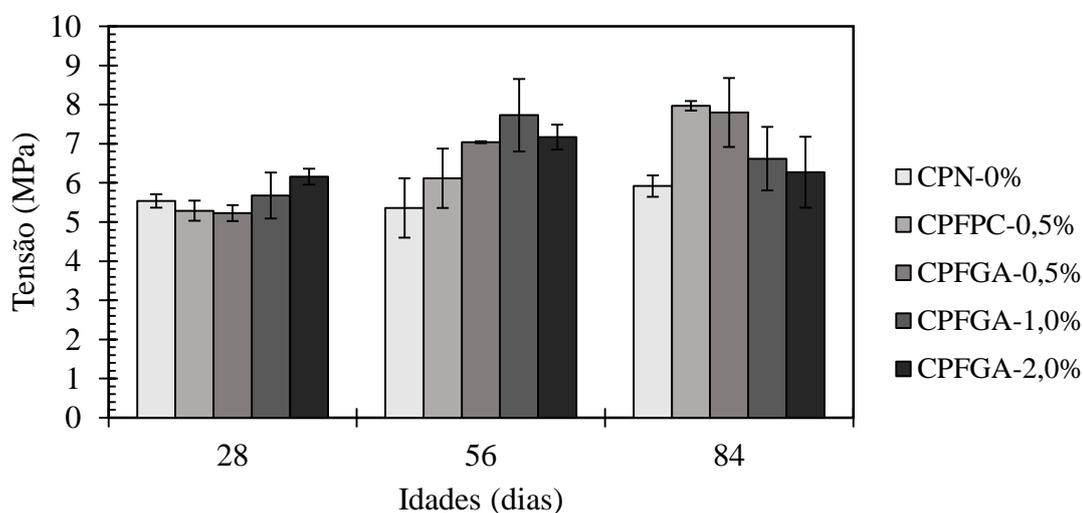
As resistências à tração na compressão diametral aos 28 dias expostas acima, mantiveram-se relativamente constante dentre todas as famílias, somente a amostra CPFGA-2,0% que apresentou um pequeno acréscimo de resistência com relação aos corpos de prova CPN-0%. Para a idade de 56 dias as amostras das famílias CPN-0% e CPFPC-0,5%, adquiriram um ganho de resistência, porém mantiveram-se constante entre elas, diferentemente das amostras CPFGA-0,5%, CPFGA-1,0% e CPFGA-2,0% que também apresentaram ganho nos resultados, porém de forma crescente, respectivamente. No entanto, para a idade de 84 dias todas as amostras mantiveram-se com resistências constantes, exceto

a amostra CPFGA-0,5% que apresentou uma queda de resistência, talvez sendo provocada por uma suposta falha de moldagem. Entretanto, no que se refere as famílias CPFGA-1,0% e CPFGA-2,0%, apresentaram menor crescimento de resistência com relação as idades de 56 dias.

#### 4.2.3 Ensaio de Tração na Flexão

O gráfico da Figura 46 apresenta os resultados dos ensaios à flexão em 4 pontos, onde constam os valores médios das tensões por idade de cada família estudada.

Figura 46 - Resistência à tração na flexão para idades de 28, 56 e 84 dias.



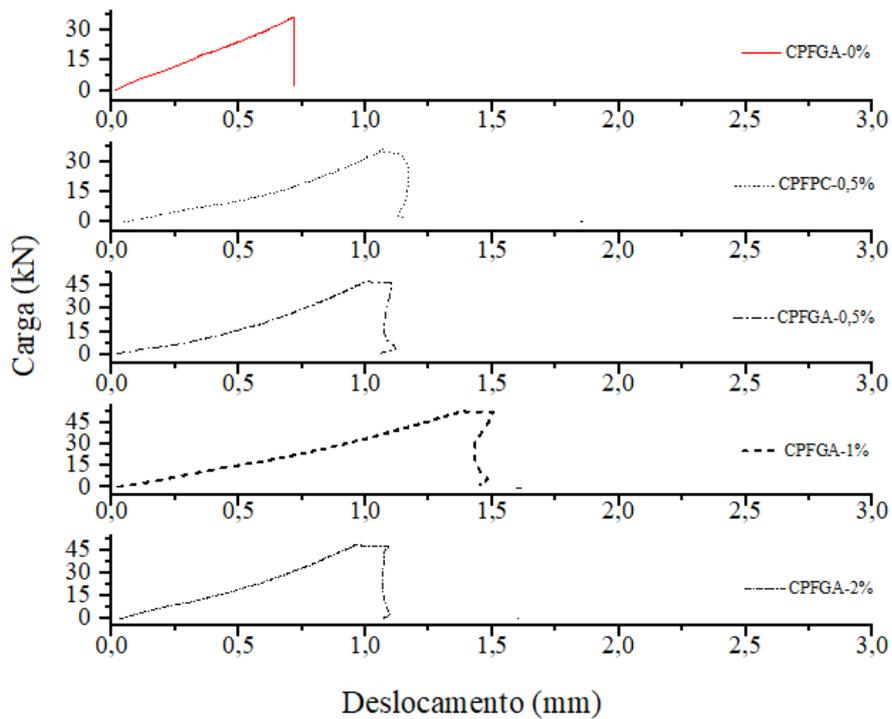
Fonte: Autor.

As resistências à tração na flexão aos 28 dias ilustrado na Figura 46, mantiveram comportamento similar ao ensaio de tração na compressão diametral, ou seja, relativamente a resistência das famílias se mostraram constantes. Para a idade de 56 dias as amostras de todas as famílias apresentaram ganho de resistência de forma crescente, conforme o aumento das frações volumétricas do resíduo de GA, tendo como a família CPFGA-1,0% a mais vantajosa. Já para a idade de 84 dias, as amostras CPFPC-0,5% e CPFGA-0,5% se tornaram mais vantajosas por suas resistências adquiridas, todavia, as amostras CPFGA-1,0% e CPFGA-2,0%, da mesma forma ocorrida no ensaio de tração na compressão diametral, apresentarem menor crescimento médio de suas de resistências com relação as idades de 56 dias, porém pelo estudo estatístico realizado e ilustrado no gráfico da Figura 46, verificou-se a possibilidade (linha de tendência) de ocorrer certa constância dentre o crescimento das

resistências para estas amostras em 56 e 84 dias. De certa forma, não se pode descartar o fato do compósito ter sido reforçado com fibras de GA aleatoriamente distribuídas na matriz. Desta forma, não há como controlar a locação das fibras no interior da mesma. Por conseguinte, o resíduo de GA pode ou não ter sido posicionado de forma que não foi capaz de contribuir o suficiente para o reforço do compósito em algumas amostras.

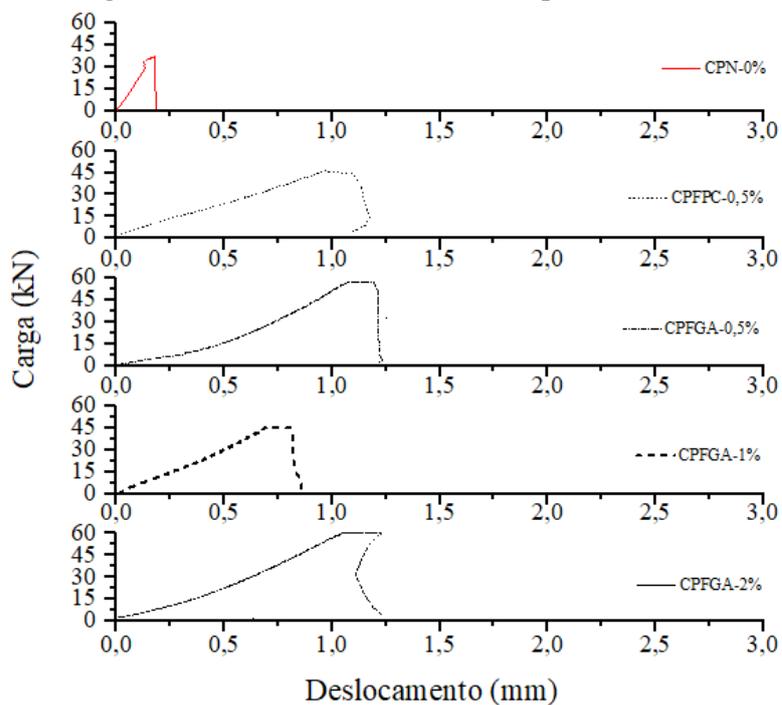
As Figuras 47 a 49 mostram exemplos das curvas carga-deslocamento para cada mistura. Visivelmente, os compósitos com a inserção da fibra de GA mostraram comportamento compatíveis com o desempenho dos corpos de prova com a adição da microfibras comerciais no desempenho sob flexão. Após o rompimento, a matriz continuou a suportar esforços, gerando uma nítida deformação pós-pico, diferentemente do ocorrido com a família de corpos de provas de referência (CPN-0%), que sofreram ruptura brusca em todas as idades, sem apresentar capacidade resistente após o pico de tensão.

Figura 47 – Curva carga-deslocamento sob flexão em 4 pontos. 28 dias.



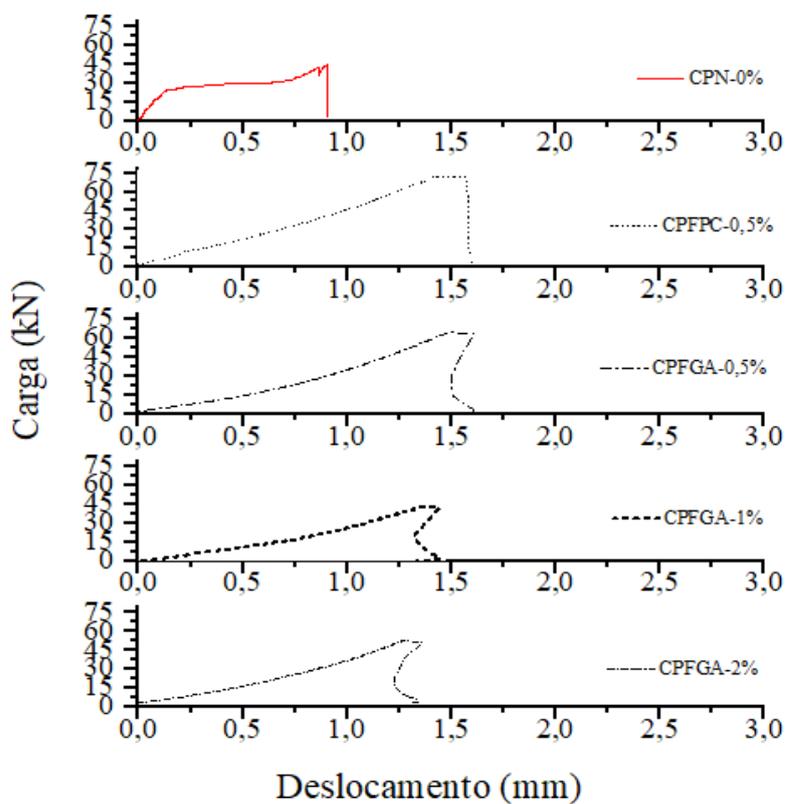
Fonte: Autor.

Figura 48 - Curva carga-deslocamento sob flexão em 4 pontos. 56 dias.



Fonte: Autor.

Figura 49 - Curva carga-deslocamento sob flexão em 4 pontos. 84 dias.



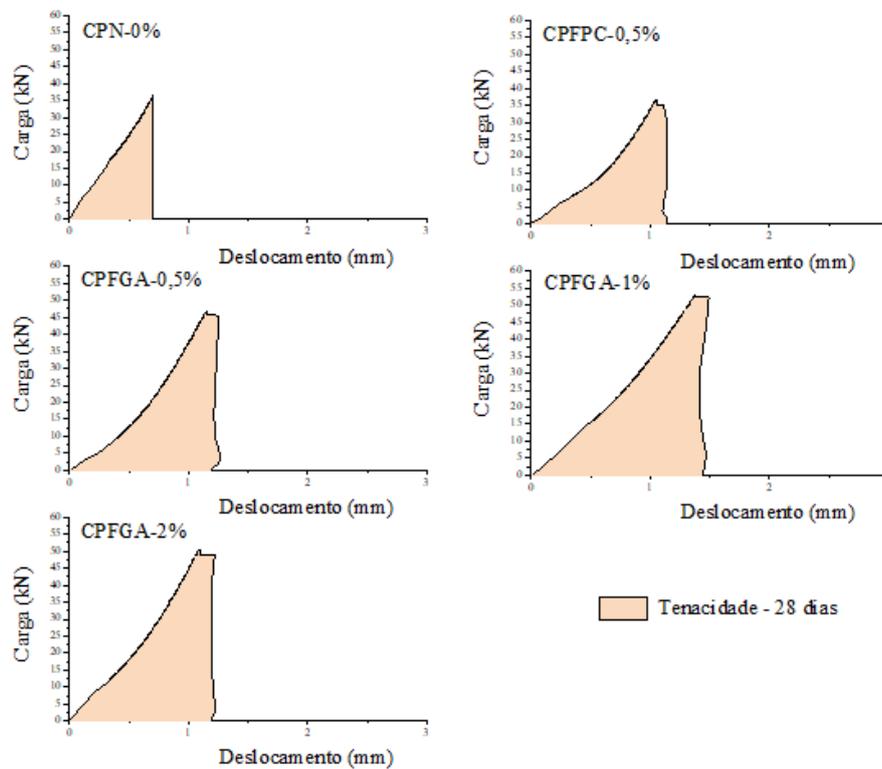
Fonte: Autor.

Nota-se que para a maioria dos gráficos gerados nas Figuras de 47 a 49, as curvas carga-deslocamento das amostras com a inserção de fibra comercial e fibra de GA ensaiadas em 56 e 84 dias apresentam uma deformação global maior em relação as amostras com CPN-0%, que de acordo com Sánchez Cruz (2003), tratar-se de uma acomodação por conta do trecho horizontal a partir do ponto zero, que indica deslocamento sem absorção de carga. Para as amostras ensaiadas aos 28 dias, esse efeito pode ser visualizado em todas famílias

#### 4.2.4 Análise da Tenacidade

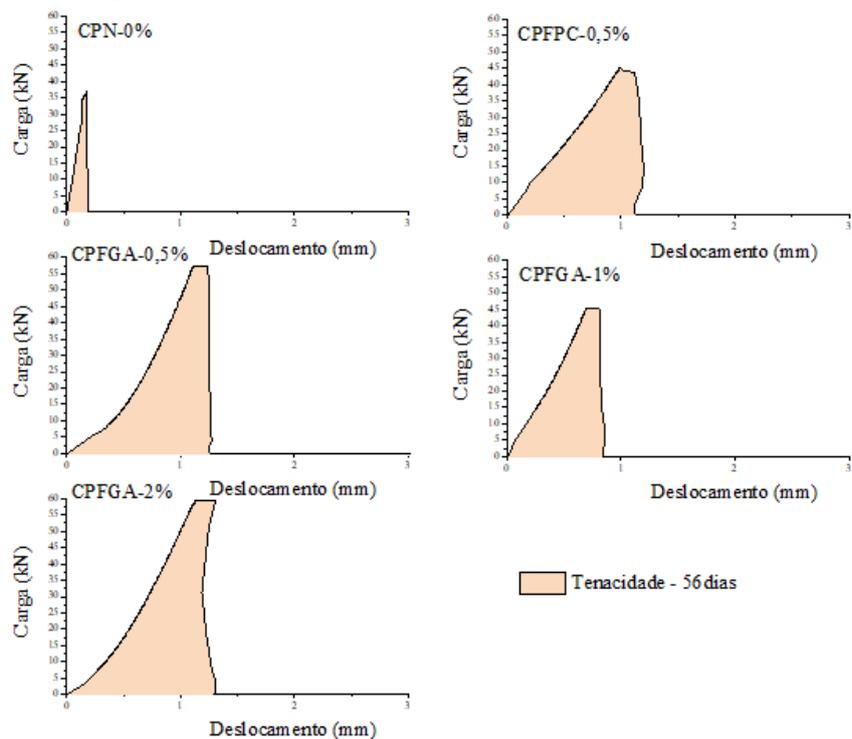
Para caracterização da tenacidade, foram calculadas as áreas abaixo da curva carga-deslocamento dos gráficos apresentados nas Figuras 50 a 52, segundo orientação da norma ASTM C1609 para corpos de prova prismáticos de 150x150x500 mm, bem como também foi considerada a metodologia utilizado pelos autores Amaral Junior, Silva e Moravia (2017). Os valores médios das idades encontrados para cada família dos compósitos estão expostos na Tabela 25 e Figura 53.

Figura 50 – Áreas para cálculo de tenacidade aos 28 dias.



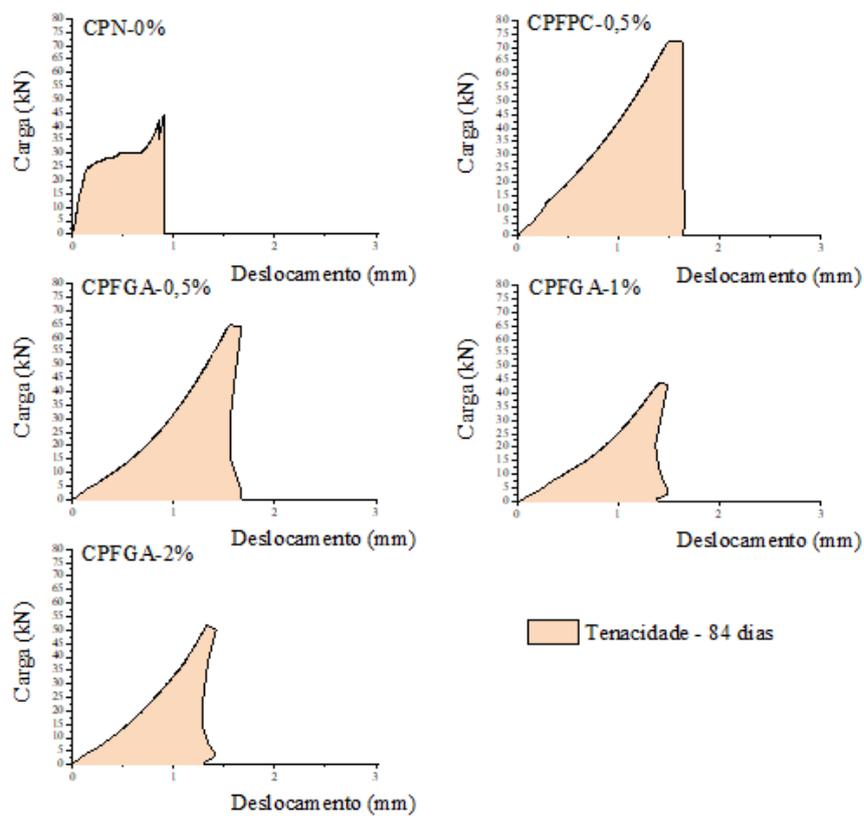
Fonte: Autor.

Figura 51 – Áreas para cálculo de tenacidade aos 56 dias.



Fonte: Autor.

Figura 52 – Áreas para cálculo de tenacidade e aos 84 dias.



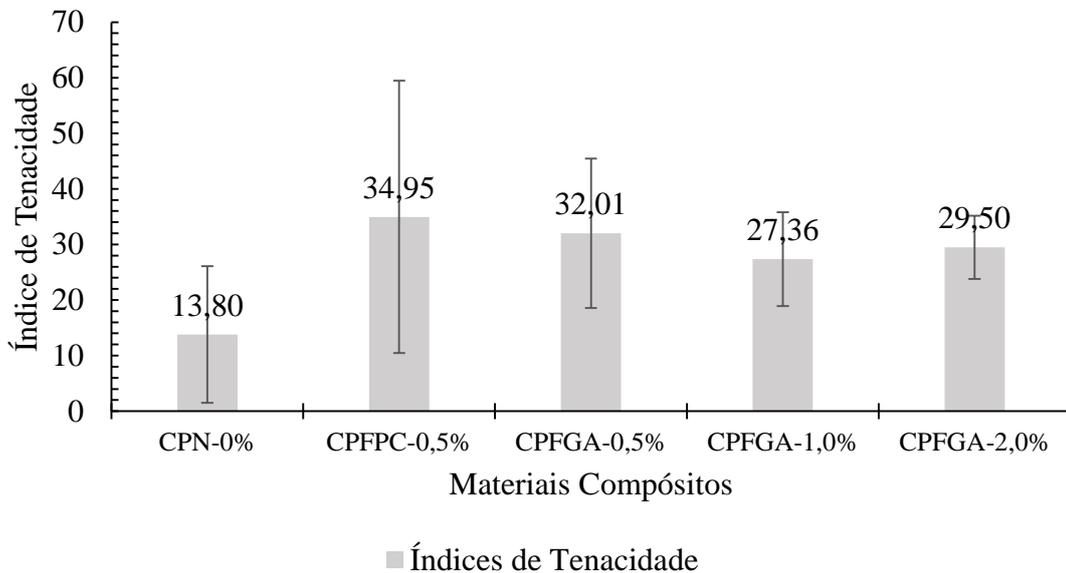
Fonte: Autor.

Tabela 25 - Índices de tenacidade dos compósitos sob flexão.

<b>Índices de Tenacidade</b>			
<b>Amostras</b>	<b>Tenacidade (kN.mm)</b>		
	<b>Média das Idades</b>	<b>DP</b>	<b>CV (%)</b>
<b>CPN-0%</b>	<b>13,80</b>	10,86	0,79
<b>CPFPC-0,5%</b>	<b>34,95</b>	21,64	0,62
<b>CPFGA-0,5%</b>	<b>32,01</b>	11,89	0,37
<b>CPFGA-1,0%</b>	<b>27,36</b>	7,44	0,27
<b>CPFGA-2,0%</b>	<b>29,50</b>	5,02	0,17

Fonte: Autor.

Figura 53 - Índices de tenacidade médio para cada família de compósitos.



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 53, para os índices de tenacidade encontrados, todas as famílias dos compósitos com inserção de fibras, tanto de garrafão de água quanto a microfibras comerciais, apresentaram valores de tenacidade acima do CPN-0%, porém o melhor resultado obtido foi para o compósito com a microfibras comerciais CPFPC-0,5%, que acresceu em média 146% em relação a família CPN-0%, enquanto que, para os compósitos CPFGA-0,5%, CPFGA-1% e CPFGA-2%, respectivamente, obtiveram acréscimo em relação a amostra CPN-0% de 120%, 101% e 104%.

O estudo de Lucena (2017), utilizou o cálculo de tenacidade de acordo com a norma ASTM C1609, para corpos de prova com adição de 0%, 1% e 2% de fibra de polipropileno, obteve resultados de 0,104, 2,874 e 3,934 kN.mm, respectivamente. Em percentual, as amostras sofreram acréscimo de 2.663% e 3.682% na mesma ordem.

Amaral Junior, Silva e Moravia (2017) obtiveram para o concreto, com 28 dias, sem adição de fibras tenacidade de 19,14 kN.mm, para o concreto com incremento de 1% de fibra de PP, apresentou tenacidade de 22,30 kN.mm, apresentando acréscimo de 16,4%.

Diante dos dados obtidos nesta pesquisa, percebe-se que conforme a metodologia aplicada para o cálculo de tenacidade, os resultados apresentaram acréscimo com relação ao estudo de Amaral Junior, Silva e Moravia (2017) para as amostras com 1% de adição de fibra de polipropileno aos 28 dias.

#### 4.2.5 Módulo de Elasticidade

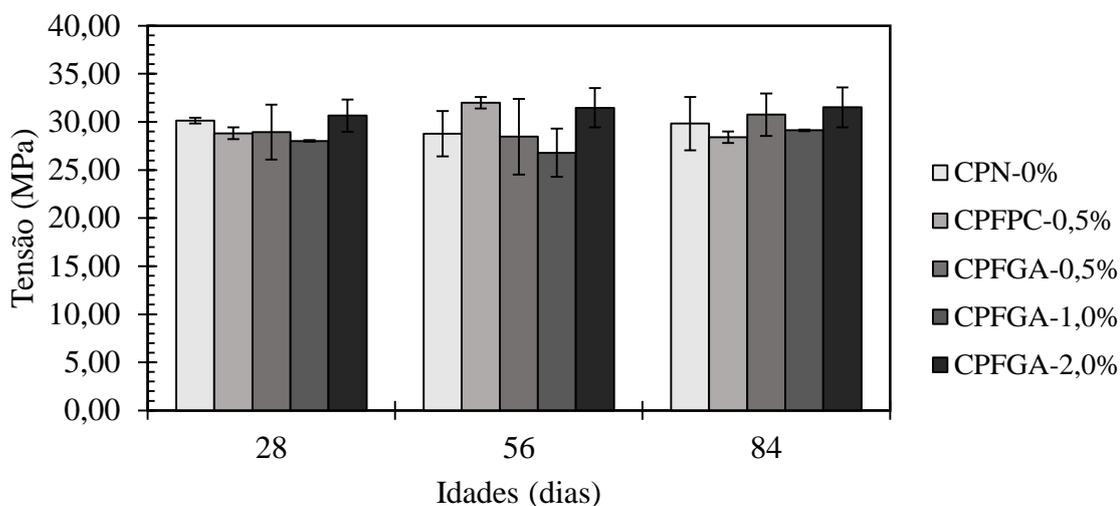
Para o ensaio de módulo de elasticidade, os resultados obtidos em diferentes idades são mostrados no gráfico da Figura 54 e nas Tabelas 26 a 29.

Dentre as médias obtidas para módulo de elasticidade, as famílias CPN-0%, CPFPC-0,5% e CPFGA-0,5%, apresentaram valores para módulo relativamente constantes, para CPFGA-1,0% obteve-se um pequeno decréscimo no valor médio apresentado no ensaio, que pode ter sido ocasionado por algum descuido no manuseio do ensaio ou até mesmo na moldagem do corpo de prova, haja vista que, qualquer que seja a falha neste ensaio, mesmo que pequena, pode acarretar em danos para os resultados finais. Por fim, a amostra CPFGA-2,0% foi a que apresentou melhor valor médio para módulo de elasticidade, acrescentando aproximadamente 5,3% com relação a CPN-0%.

Na pesquisa de Amaral Junior, Silva e Moravia (2017), os valores de módulo de elasticidade obtidos para o concreto sem adição de fibras foi de 23,2 GPa, entretanto, para o concreto com incremento de 1% de fibra de PP, apresentou módulo de 22,30 GPa representando acréscimo de 16,4%.

Diante dos dados apresentados, percebe-se que conforme a metodologia aplicada para o cálculo de tenacidade, os resultados variam, não mantendo, portanto, uma equivalência.

Figura 54 – Módulo de Elasticidade para idades de 28, 56 e 84 dias.



Fonte: Autor.

Tabela 26 - Módulo de Elasticidade para idades de 28 dias.

<b>Módulo de Elasticidade – Eci (valores expressos em GPa)</b>					
<b>28 dias</b>					
<b>Amostras</b>	<b>CPN-0%</b>	<b>CPFPC-0,5%</b>	<b>CPFGA-0,5%</b>	<b>CPFGA-1,0%</b>	<b>CPFGA-2,0%</b>
<b>Média</b>	30,14	28,82	28,94	28,03	30,65
<b>DP</b>	0,21	0,44	2,06	0,06	1,2
<b>CV (%)</b>	0,70%	1,53%	7,12%	0,21%	3,92%
<b>Nº</b>	2	2	2	2	2

Fonte: Autor.

Tabela 27 - Módulo de Elasticidade para idades de 56 dias.

<b>Módulo de Elasticidade – Eci (valores expressos em GPa)</b>					
<b>56 dias</b>					
<b>Amostras</b>	<b>CPN-0%</b>	<b>CPFPC-0,5%</b>	<b>CPFGA-0,5%</b>	<b>CPFGA-1,0%</b>	<b>CPFGA-2,0%</b>
<b>Média</b>	28,78	30,28	28,47	26,79	31,48
<b>DP</b>	1,69	0,43	2,84	1,81	1,48
<b>CV (%)</b>	5,87%	1,34%	9,98%	6,76%	4,70%
<b>Nº</b>	2	2	2	2	2

Fonte: Autor.

Tabela 28 - Módulo de Elasticidade para idades de 84 dias.

<b>Módulo de Elasticidade – Eci (valores expressos em GPa)</b>					
<b>84 dias</b>					
<b>Amostras</b>	<b>CPN-0%</b>	<b>CPFPC-0,5%</b>	<b>CPFGA-0,5%</b>	<b>CPFGA-1,0%</b>	<b>CPFGA-2,0%</b>
<b>Média</b>	29,83	28,42	30,75	29,13	31,52
<b>DP</b>	2	0,43	1,6	0,06	1,5
<b>CV (%)</b>	6,71%	1,51%	5,20%	0,21%	4,76%
<b>Nº</b>	2	2	2	2	2

Fonte: Autor.

Tabela 29 - Média dos módulos de elasticidade por famílias.

<b>Módulo de Elasticidade – Eci (valores expressos em GPa)</b>					
<b>Amostras</b>	<b>CPN-0%</b>	<b>CPFPC-0,5%</b>	<b>CPFGA-0,5%</b>	<b>CPFGA-1,0%</b>	<b>CPFGA-2,0%</b>
<b>Idades</b>					
28 dias	30,14	28,82	28,94	28,03	30,65
56 dias	28,78	30,28	28,47	26,79	31,31
84 dias	29,83	28,42	30,75	29,13	31,52
<b>Média</b>	<b>29,58</b>	<b>29,17</b>	<b>29,39</b>	<b>27,98</b>	<b>31,16</b>

Fonte: Autor.

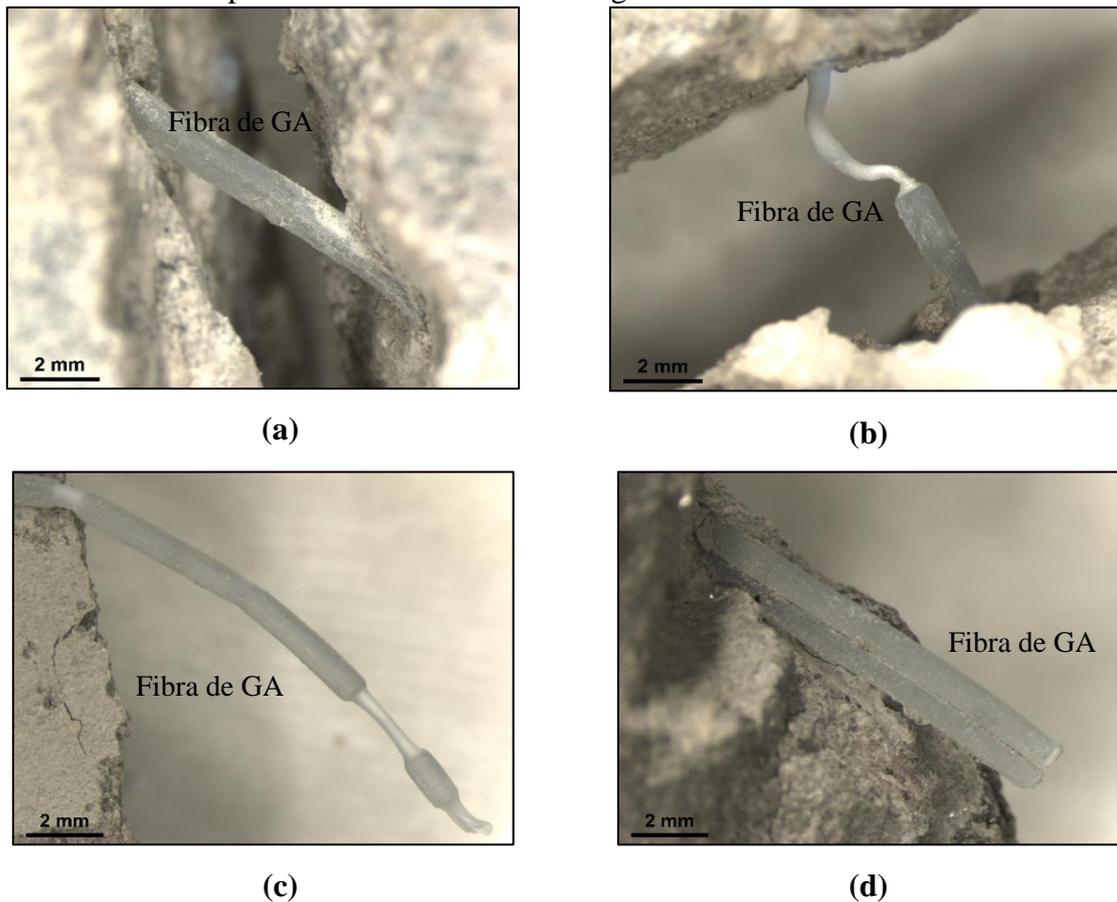
#### 4.3 Microscopia óptica e Microscopia eletrônica por varredura (MEV)

Com o intuito de melhor entender o material do compósito e observa possíveis falha na interação fibra-matriz apresenta-se nesta parte do trabalho um estudo utilizando-se a Microscopia Ótica e o a Microscopia de Eletrônica de Varredura.

Ao realizar as imagens por microscópio óptico, visualizou-se quatro tipos de comportamento da fibra de resíduo de GA pós ensaio de tração, uma delas ocorre na Figura 55.a, onde nitidamente o resíduo não se rompe mesmo com o acontecimento da fratura. Na Figura 55.b, o resíduo sofre um alongamento, comportamento explicado por Callister (2016), devido a forma de suas cadeias moleculares se assemelhar a um emaranhado de linha de pesca, neste caso, também não houve o rompimento do resíduo mesmo após a fratura da matriz. Em contrapartida, a Figura 55.c e 55.d mostra o rompimento da fibra de GA, sendo

que a primeira apresentou um alongamento considerável em três pontos diferentes ao longo da fibra antes da ruptura, e, a segunda imagem mostrou que quase não houve a ocorrência de alongamento, ou seja, praticamente sucedeu a quebra do resíduo.

Figura 55 – Imagens por microscópio óptico pós ensaio de tração. (a) Fibra de GA não rompida. (b) Fibra de GA não rompida com a ocorrência de alongamento. (c) Fibra de GA rompida com a ocorrência de alongamento. (d) Fibra de GA rompida sem a ocorrência de alongamento.



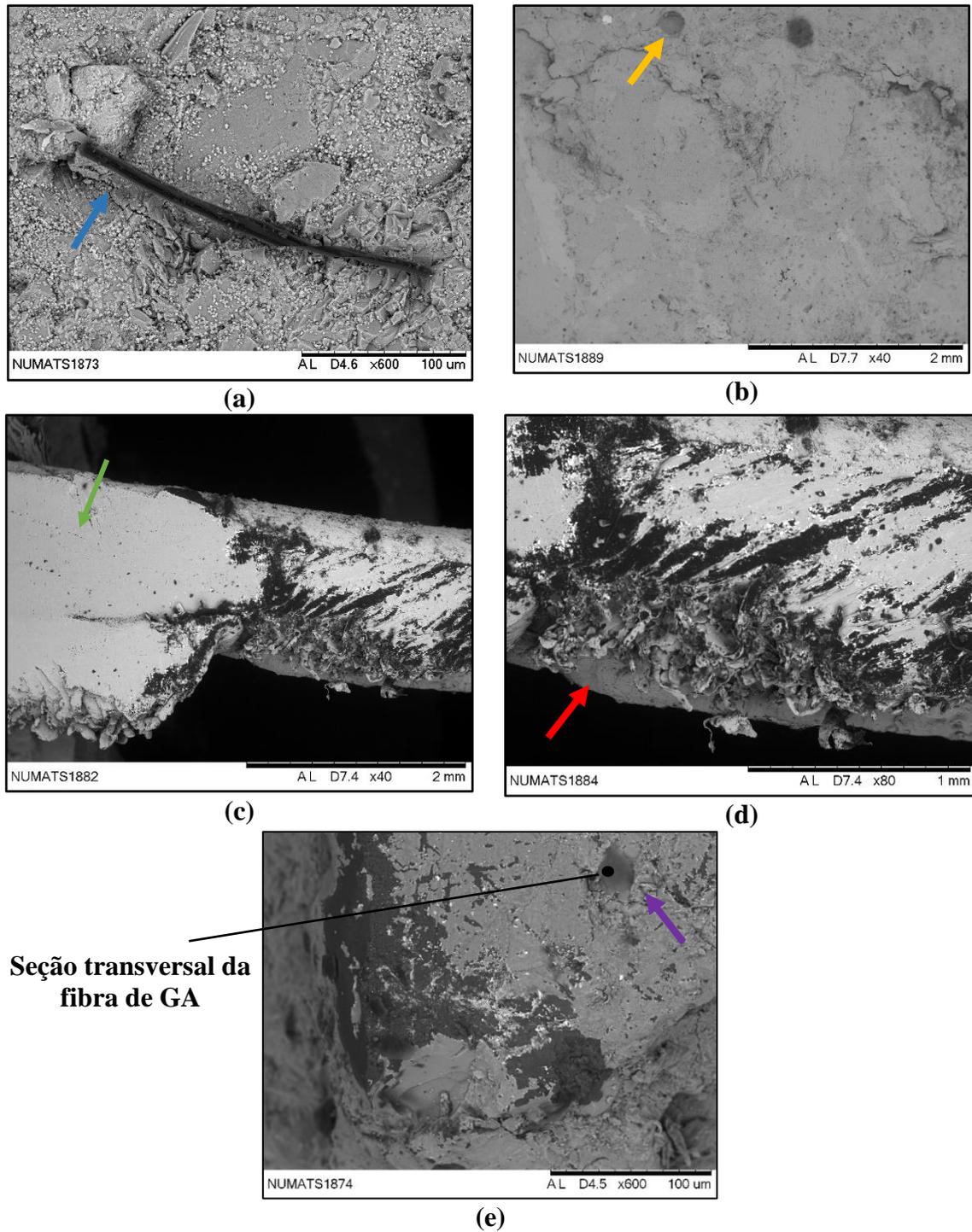
Fonte: Autor.

A análise por microscopia eletrônica por varredura (MEV) permite além de outras identificações, a verificação da porosidade e da aderência entre a pasta de cimento e os agregados. Os poros podem ser visualizados nas micrografias apresentadas na Figura 56.b, a seta em amarelo indica os poros grandes e a seta verde indicam os microporos (Figura 56.c). Apesar da presença desses poros, verificamos a baixa frequência da ocorrência destes, resultado proveniente a adição da sílica ativa.

Não somente isso, mas também, pode ser verificado a rugosidade microscópica que a fibra de GA possui apontada pela seta vermelha (Figura 56.d), sendo um dos fatores que podem ter contribuído para uma melhor aderência à matriz, proporcionando ao compósito

um melhor desempenho à compressão. Verifica-se também que as partículas do resíduo estão totalmente envolvidas pela argamassa da matriz (Figura 56.e).

Figura 56 – Micrografias por MEV de amostras rompidas.



Fonte: Autor.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Nesta seção da pesquisa apresenta-se os resultados obtidos conforme os principais objetivos da mesma, traduzindo-se nas conclusões principais do trabalho. No que concerne as propriedades físicas e mecânicas, tanto para as fibras de GA, quanto para os compósitos com matriz cimentícia que as tiveram como reforço, foi possível notar que tais situações abordadas nesse trabalho são vulneráveis a variações em seus valores. Desta forma, supõe-se que tal acontecimento se deva ao fato de serem fibras de materiais reciclados, que não passam por processos de beneficiamento industrial para adquirirem uma finalidade exclusiva de uso, como realizado por Yin et al. (2013), descrito no item 2.3.2. Não somente isso, mas o compósito foi reforçado com fibras de GA aleatoriamente distribuídas na matriz. Desta forma, não há como controlar o posicionamento das fibras no interior do compósito. Portanto, o resíduo de GA pode ou não estar locado de forma em que possa contribuir para o reforço do mesmo.

- Na caracterização física das fibras de GA, a medida do diâmetro mostrou variação entre os valores obtidos pelos dois métodos utilizados, sendo eles, paquímetro e microscópio digital. Pelo método do paquímetro obteve-se um diâmetro menor ( $1,52\text{mm}^2$ ), inferior em cerca de 38%, com relação ao medido pelo microscópio ( $2,10\text{mm}^2$ ), desta forma, recomenda-se a utilização de microscópio para a realização de medidas em fibras, por conta do mesmo não pressionar excessivamente a fibra, de modo que a deforme e gere um resultado abaixo do real;
- As fibras de GA apresentaram valor médio de absorção de carga máxima para o ensaio de tração em torno de 21,90N, resultado este significativamente inferior aos apresentados pelas fibras comerciais, no entanto, o módulo de elasticidade se mostrou compatível com as fibras comercializadas de polipropileno, em média 4,12GPa. Porém, estes resultados apresentaram elevados coeficientes de variação, sendo que para o ensaio de tração consistiu em 43,10% e para módulo foi de 34,71%. Acredita-se que essa dispersão dos resultados, para o ensaio de tração no resíduo de GA pode ter ocorrido por supostas falhas superficiais do material, prejudicando o seu desempenho, e, para o módulo de elasticidade apresentou-se, também, como um fator causador da variabilidade de resultados, a disparidade expressiva das seções transversais da fibra de GA;

- Com relação a resistência química/durabilidade, no tocante ao ataque de álcalis, as fibras de GA obtiveram resultados satisfatórios, não apresentaram perda de massa durante os 30 dias de imersão do material em meio alcalino a temperatura de 60°C, conforme orientação da ANAPRE, onde permite uma variação de até 2% de perda de massa;
- Com adição de fibras de GA ao concreto para pavimento foi verificado um ganho de resistência à compressão gradativo com o acréscimo na fração volumétrica (0,5%, 1% e 2%) incorporada a massa de concreto para as idades de 28, 56 e 84 dias, presume-se que esta adição pode ter contribuído para o processo de cura interna, através do controle de exsudação, por retenção de parte da água que poderia evaporar.
- Para os ensaios de tração por compressão diametral as amostras com adição de resíduo de GA (0,5%, 1% e 2%) aos 84 dias sofreram uma queda de resistência, da mesma forma ocorreu para o ensaio de tração na flexão para as amostras com 1% e 2% de adição de resíduo de GA, também aos 84 dias, porém ao analisar as linhas de tendência que puderam ser geradas nos tratamentos estatísticos (erro padrão), pode ser suposto uma constância nos resultados de resistência a tração para os teores de 1% e 2% nas idade de 56 e 84 dias. Porém, essa depressão ocorrida nos resultados das amostras citadas, podem ter acontecido pelo fato das fibras estarem aleatoriamente distribuídas na matriz. Podendo ou não estarem posicionadas transversalmente a força aplicada no momento do ensaio;
- Para os valores de tenacidade encontrados a partir dos gráficos gerados no ensaio de tração na flexão, verificou-se um maior ganho de energia pós fissura para a amostra com adição da microfibrilha comercial (CPFPC-0,5%), em média 146% em relação a família CPN-0%, enquanto que, para os compósitos com incremento de resíduo de GA, CPFGA-0,5%, CPFGA-1% e CPFGA-2%, respectivamente, obtiveram acréscimo em relação a amostra CPN-0% de 120%, 101% e 104%;
- Quanto aos ensaios de módulo de elasticidade, os valores obtidos para todas as famílias estudadas, apresentaram certa constância nos resultados;
- Em relação as imagens por microscópio óptico, observou-se um comportamento dúctil (com significativa deformação) por parte da fibra de GA, onde essas sofreram alongamento antes de sua ruptura, por esse motivo, apresentaram bons resultados para módulo de elasticidade. Todavia, no que engloba as imagens realizadas pelo microscópio eletrônico por varredura, foi notada a presença de rugosidade, sendo este pressuposto para a melhoria na aderência à matriz e, por conseguinte no

desempenho do compósito à compressão. Verificou-se também o envolvimento total da matriz cimentícia nas fibras de GA.

Diante das constatações apresentadas nesta pesquisa, os traços elaborados, fabricados e testados com fibra residual de GA apresentaram desempenho compatível e/ou superior no que concerne às propriedades estudadas em relação ao concreto com adição de microfibras comerciais, exceto para a análise de tenacidade que os compósitos com a o incremento do resíduo de GA apresentaram em média 15% menor crescimento que as amostras com a microfibras comerciais. Dessa forma, a utilização do material de GA como reforço de matriz cimentícia requer uma atenção especial, uma vez que, para se tornar um produto comercialmente aplicado em larga escala, o mesmo ainda carece de maior desenvolvimento técnico/científico. Devemos enfatizar que, essas conclusões se limitam apenas as amostras ensaiadas e analisadas nesta pesquisa. Entretanto, mais ensaios são necessários para conclusões definitivas.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Diante dos benefícios ambientais e econômicos que podem apresentar o reaproveitamento de resíduos sólidos, nessa pesquisa, são listadas a seguir algumas sugestões para pesquisas futuras que visem a continuidade no estudo desse material:

- Estudo para beneficiamento do resíduo de GA nas próprias empresas de reciclagem;
- Estudo de formas de tratamento para a melhoria as propriedades mecânicas do resíduo;
- Estudo da durabilidade de concretos com fibras de GA em ambientes agressivos;
- Estudo do potencial de utilização do resíduo de GA para reforço em argamassa e outros tipos de concreto;
- Estudo de tenacidade seguindo as recomendações das normas vigentes em sua totalidade com uma análise comparativa;
- Realização do ensaio de Pull-out no compósito com reforço de fibra de GA.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGNELLI, J. A. M.; CHINELATTO, M.A. Degradação de Polipropileno: aspectos teóricos e recentes avanços em sua estabilização. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 2, n. 3, pp. 27-31, 1992.

AGUIAR NETO, S. A.; LIMA, J. M.; SILVA, C. A. S.; PAUMGARTTEN, J. V.V.V.; PIKANÇO, M. S.; QUEIROZ, L. C. Resíduos Plásticos na Construção Civil: Utilização de Resíduos de Vasilhames de Água Mineral como Agregados de Concretos. In: 58º Congresso Brasileiro do Concreto, 2016, Belo Horizonte. Ciência e Tecnologia para a Construção em Concreto. **Anais**. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2016.

AL-SHATHER, L. M.; ALI, A. A.; ABED, H. M. The Shear Behavior of Reinforced Concrete I-Beams With Polypropylene Fiber. **Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES)**, v. 22, n. 5, pp. 1040-1046, 2017.

AMARAL JUNIOR, J. C.; SILVA, L. C. F.; MORAVIA, W. G. Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista matéria**, São Paulo, v. 22, n. 1, 2017.

AMERICA SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1557**: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers, 2014. 10p.

AMERICA SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D543**: Standard Practices for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical Reagents, 2014. 7p.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução da diretoria colegiada - RDC Nº. 173**. Regulamento técnico de boas práticas para industrialização e comercialização de água mineral natural e de água natural e a lista de verificação das boas práticas para industrialização e comercialização de água mineral natural e de água natural, 2006.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 2014. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico. Abiplast. São Paulo. 2016. Disponível em: <[http://file.abiplast.org.br/file/download/2017/Perfil\\_2016\\_Abiplast\\_web.pdf](http://file.abiplast.org.br/file/download/2017/Perfil_2016_Abiplast_web.pdf)> Acesso: 08 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13230: **Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis - Identificação e simbologia**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46: **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: **Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: **Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. **CF 001/2011**. Macrofibras Sintéticas para Pisos Industriais – Especificação. São Paulo, 2012.

BARROSO, M. D. B. **Desenvolvimento de Compósitos com Matriz de Geopolímeros Reforçados com Partículas de Quasicristais AlCuFe**. 2009. Parte 1-64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

BITTENCOURT, R. M.; FARIAS, L. A.; INÁCIO, J. J.; MARQUES, R. A. **Relatório do XIX Programa Interlaboratorial de Ensaios de Concreto/2013**, Furnas Centrais Elétricas S.A., à Comissão Técnica de Laboratórios de Ensaios em Construção Civil do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO-CTLE-01), Goiânia, 2014.

BEGLARIGALE, A.; YAZICI, H. Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. **Construction and Building Materials**, v. 75, pp. 255-265, 2015.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites, Second Edition**. Modern Concrete Technology Series, London and New York, 2007.

BRANDT, A.M. Fiber reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**, v. 86, pp.3 -9, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resíduos de plástico, papel, papelão, papel metalizado, vidro e metal. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/informma/item/9411-res%C3%ADduos-de-pl%C3%A1stico,-papel,-papel%C3%A3o,-papel-metalizado,-vidro-e-metal>>. Acesso em: 02 maio 2017.

BRASIL, Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria nº 128, de 25 de março de 2011. DOU de 29/03/2011.

BRITO, G. F.; AGRAWAL, E. M.; ARAÚJO, T. A. J. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6, n. 2. Pp. 127- 139. Disponível em: <[www.dema.ufcg.edu.br/revista](http://www.dema.ufcg.edu.br/revista)> Acesso em: 10 nov. 2018.

BURATTI, N.; MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M. Post-cracking behavior of steel and macro-synthetic fiber-reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, pp. 2713-2722, 2011.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos, 2016. 882 p.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, Visando a Substituição de Agregado Miúdo em Argamassas**. PUC-Rio, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. Rio de Janeiro, 2005.

CORREIA, E. A. S. **Compósitos de Matriz Geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e de sisal**. 2011. 113f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). Manual técnico de elaboração do Sumário Mineral-2015. Brasília: DNPM, 2016. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

DEPARTMENT FOR TRANSPORT. Vehicle Licensing Statistics: Quarter 4 (Oct - Dec) 2015, 2016 08/05/2016]; Available from: <[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/516429/vehicle-licensing-statistics-2015.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/516429/vehicle-licensing-statistics-2015.pdf)>. Acesso em: 17 de out. 2018

DIAZ-SILVARREY L.S.; PHAN A.N., Kinetic study of municipal plastic waste. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, pp. 16352-16364, 2016.

DUARTE, L. C.; JUCHEM, P. L.; PULZI, G. M.; BRUM, T. M. M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros**. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ESTRADA CÁCERES, A. R. **Caracterização Geométrica e Mecânica de Macrofibras Poliméricas**. 2016. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14899-2**. Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres - Definitions, specifications and conformity. European Standard, 2008.

ÊXODO, cap. 5, vers. 6-7. **A Bíblia Sagrada**. Barueri/SP: Editora Mundo Cristão, 2013.

FALLAF, S; NEMATZADEH, M., Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 132, pp.170-187, 2017.

FREITAS, C. **Estudo do Desempenho Mecânico de Concreto com Adição de Partículas de Borracha para Aplicação como Material de Reparo em Superfícies Hidráulicas**. Curitiba, 2007. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Departamento de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

FIGUEIREDO A. D. **Concreto com fibras de aço**. Boletim Técnico (BT/PCC/260). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000.

FIGUEIREDO A. D., TANESI J., NICE A. A. Concreto com fibras de polipropileno. **Téchne**, v. 10, p. 66; São Paulo, 2002.

FIGUEIREDO, A. D.; DE LA FLUENTE, A.; AGUADO, A.; MOLINS, C.; VIÑOLAS, B. Análise de Viabilidade do Uso de Fibras Metálicas em Tubos de Concreto. Parte 1: Campanha Experimental. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 52, 2010, Fortaleza. Novas Tecnologias do Concreto para Crescimento Sustentável. **Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo: IBRACON, 2010.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras**. São Paulo. 248p. Tese (Doutorado em Livre-Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

VIDA E CIDADANIA. Galões de água mineral vencidos viram problema para vendedores. *Gazeta do Povo*. Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/galoes-de-agua-mineral-vencidos-viram-problema-para-vendedores-e5d5du7txcpyc3draw4w79jri>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

GONÇALVES, F. A. C.; AMARAL, E. L. S.; LOPES JUNIOR, J. L.; LOPES, B.L.S.; RIBEIRO JUNIOR, L. S.; BRABO, D. R.; AMARANTE, C. B. Fibras Vegetais: Aspectos Gerais, Aproveitamento, Inovação Tecnológica e uso em Compósitos. **Revista Espacios**, v. 39, pp. 12, 2018.

HANNANT, D. J. **Polypropylene Fibres in Concrete, Mortar, and Cement,” Chapter 7 in Fibre Cements and Fibre Concretes**, John Wiley & Sons, 1978.

HESAMI, S.; HIKOUEI, I. S.; EMADI, S. A. A. Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycle tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, pp. 228-234, 2016.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. Plastics recycling: challenges and opportunities. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serie B, Biological Sciences**, v. 364, pp. 2115-2126, 2009.

JAFARIFAR, N.; PILAKOUTAS, K. BENNETT, T. Moisture transport and drying shrinkage properties of steel-fiber-reinforced-concrete. **Construction and Building Materials**, v.73, pp. 41-50, 2014.

KÖROGLU, M. A. Mechanical characterization of recycled polypropylene and copolymer macro fibers in concrete. **International Scientific Journals**, v. 11, pp 141-143, 2017.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. 2017. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012. 201f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO P. J. M. **CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2014.

MOGRE, R.P.; PARBAT, D.K. Behavior of polypropylene fiber reinforced concrete with artificial sand. **International Refereed Journal of Engineering and Science**, v. 1, issue 2, p. 37-40, 2012.

MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto**. 2007. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Construção Civil e Urbana) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NEOMATEX. Fibras para túneis. Disponível em: < <https://www.neomatex.com.br/fibras-tuneis>>. Acesso em: 08 nov. 2018.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J.; **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013

OLIVEIRA, M. **Gestão de Resíduos Plásticos Pós-Consumo: Perspectivas para a Reciclagem no Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado Programa de Planejamento Energético), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

OUCIEF, H.; HABITA, M.; REDJEL, B. Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete: hardened properties. *IJCE* v. 4, pp.77-85, 2006.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. R.; GRANDO, F.; HELENE, P. Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 56, 2014, Natal. **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo: IBRACON, 2014.

PICANÇO, M. S. **Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Curauá**. 2005. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007.

RECICLAGEM DE PLÁSTICOS. Reciclagem dos Plásticos. 2013. Disponível em: <<http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-plasticos-polimeros/>>. Acesso em: 05 nov. 2017

RECYCLING TODAY. Mixing Things Up. 2016. Disponível em: <<http://www.recyclingtoday.com/article/mixing-things-up/>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

SÁNCHEZ CRUZ, M. L. **Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie *Phyllostachys aurea* : Comportamento à flambagem**. Rio de Janeiro,

2002. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2002.

SAYYAR, M.; SOROUSHIAN, P.; SADIQ, M. M.; BALACHANDRA, A.; LU, J. Low-cost glass fiber composites with enhanced alkali resistance tailored towards concrete reinforcement. **Construction and Building Materials** v. 44, pp. 548-563, 2013.

SETOR RECICLAGEM. Processo de Reciclagem do Plástico. 2015. Disponível em: <<http://www.setorreciclagem.com.br/reciclagem-de-plastico/processo-de-reciclagem-de-plastico/>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

SILVA, I. N.; SILVA JUNIOR, J.Z.R., 2017. Tecnologia aplicada no BRT-Belém: Correlação entre as resistências à compressão e a tração a flexão do concreto. In. Congresso Brasileiro do Concreto, 59, 2017, Bento Gonçalves. **Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto**. Rio Grande do Sul: IBRACON, 2017.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J.; tradução: COSTA, N. G.; CARVALHO, R. D. M.; MELO, M. L. N. M. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

SOYLEV, T.A; OZTURAN, T. Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction. **Construction and Building Materials**, v. 73 pp. 67-75, 2014.

SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 1, pp. 65-72, 2005.

TANESI, J. **Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP)**. BT/PCC/239. Escola Politécnica. São Paulo, 1999.

TASSEW, S.T; LUBELL, A.S. Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete. **Construction and Building Materials**, v. 51, pp. 214-224, 2014.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Energy and the Environment, 2016; Available from: <https://www.epa.gov/energy>. Acesso em: 11 nov. 2017.

VAN VLACK, L. H.; tradução: FERRÃO. L. P. C. **Princípios de ciência dos materiais**. São Paulo: Blücher, 2011.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments, **J. Geology**. v. 30, pp.377–392, 1922.

YIN, S.; TULADHAR, R.; SHANKS, R. A.; COLLISTER, T.; COMBE, M.; JACOB, M.; ET AL. Fiber preparation and mechanical properties of recycle polypropylene for reinforcing concrete. **Jornal Applied Polymer Science**, pp. 132, 2015.

YIN, S.; TULADHAR, R.; SHI, F.; COMBE, M.; COLLISTER, T.; SIVAKUGAN, N.  
Use of macro plastic fiber in concrete: A review. **Construction and Building Materials**,  
v. 93, pp.180-188, 2015.

ZOLLO, R.F. Fiber-reinforced concrete: na overview after 30 years of development.  
**Cement and Concrete Composites**, v. 19, pp.107-122, 1997.