

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

ANDRÉ LEONARDO KRUTSCH

**ESTUDO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO - GFRC  
(*GLASS FIBER REINFORCED CONCRETE*) PARA PAINÉIS DE FECHAMENTO  
PRÉ-FABRICADOS**

Curitiba

2022

ANDRÉ LEONARDO KRUTSCH

**ESTUDO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO - GFRC  
(GLASS FIBER REINFORCED CONCRETE) PARA PAINÉIS DE FECHAMENTO  
PRÉ-FABRICADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Tecnologia de Materiais, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof.<sup>a</sup>. D. Sc. Mariana D'Orey  
Gaivão Portella

Coorientador: Prof. Me. Jeferson Luiz Bronholo

Curitiba

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

---

K94 Krutsch, André Leonardo

Estudo do concreto reforçado com fibras de vidro - GFRC (*glass fiber reinforced concrete*) para painéis de fechamento pré-fabricados. / André Leonardo Krutsch. – Curitiba: LACTEC: IEP, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP).

Orientador: Prof.<sup>a</sup> D. Sc. Mariana D'Orey Gaivão Portella.

Coorientador: Prof. Me. Jeferson Luiz Bronholo.

1. Concreto. 2. Fibra de vidro. I. Gaivão, Mariana D'Orey Portella. II. Bronholo, Jeferson Luiz. III. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. IV Instituto de Engenharia do Paraná. V. Título.

---

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

## TERMO DE APROVAÇÃO

**ANDRÉ LEONARDO KRUTSCH**

### **ESTUDO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO – GFRC (GLASS FIBER REINFORCED CONCRETE) PARA PAINÉIS DE FECHAMENTO PRÉ-FABRICADOS**

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:

*Mariana P. Bragança*

Mariana P. Bragança (14 de Junho de 2022 10:10 ADT)

**ORIENTADOR (A): Prof.ª Dr.ª Mariana d'Orey Gaivão Portella Bragança**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)

*Kleber Franke Portella*

**Prof. Dr. Kleber Franke Portella**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)

*Ronaldo Junior*

Ronaldo Junior (19 de Junho de 2022 09:51 ADT)

**Prof. Dr. Ronaldo de Medeiros Júnior**  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 14 de abril de 2022.

“Apenas a educação liberta.”

Epicteto

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Caroline Brockveld Krutsch, pelos incentivos, esforço pessoal, ajuda e parceria nestes últimos anos, sempre olhando para o futuro.

Aos meus pais, por todo o apoio e incentivo, desde criança, buscando sempre me educar da melhor maneira para que este momento chegasse.

Aos Professores orientadores Dra. Mariana D'Orey Gaivão Portella Bragança, e Me. Jeferson Luiz Bronholo, pela orientação e direção nos momentos mais críticos, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Dr. Luiz Alkimin de Lacerda, e Dr. Kleber Franke Portella, pelas considerações e orientações na qualificação desta pesquisa, essenciais para o alinhamento da mesma.

À Liga Química, pelo apoio e parceria para a conclusão deste trabalho, pelo incentivo na busca constante de crescimento profissional.

À equipe do LAME, por auxiliarem nos ensaios laboratoriais, os quais foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao LACTEC Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, juntamente com o Instituto de Engenharia do Paraná, pela oportunidade de realização do mestrado profissional.

Aos amigos que estiveram sempre ao meu lado, e todos aqueles que sempre me apoiaram nesta etapa, meu muito obrigado!

## RESUMO

O concreto é um material cimentício e possui propriedades mecânicas que o torna um dos materiais estruturais mais utilizados no mundo. Dentro desse contexto, há o concreto reforçado com fibras de vidro – GFRC, onde este leva a adição de fibra de vidro, com a finalidade de melhorar o desempenho mecânico do compósito. Embora tal material já venha sendo estudado, o uso no país ainda não está consolidado, devido a carência de informações que tragam segurança aos projetistas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da adição de fibra de vidro em uma matriz cimentícia, comparando o desempenho mecânico no estado endurecido, como a resistência à compressão, flexão e módulo de elasticidade. No estado fresco, comparou-se a massa específica e o abatimento. Foram elaborados dois traços que atendessem às necessidades de um painel de fechamento, tanto em abatimento, quanto em desempenho mecânico. Foi realizado um dos traços sem a adição de fibra e outro com a adição de fibra de vidro do tipo AR (álcali resistente), na proporção de 1% sobre o peso do cimento, com a finalidade de verificar a influência desta no compósito. A relação a/agl (água/aglomerante) foi a mesma nas misturas, de modo que a única variável fosse a adição da fibra de vidro. Com base nos resultados obtidos, foi possível identificar que a adição da fibra de vidro influenciou no abatimento, sendo 12,5% menor em comparação à referência, bem como na resistência à compressão, onde o compósito com a adição de fibra de vidro teve uma resistência mecânica 6% superior. Entretanto, não se observou variação na resistência à tração, resistência à flexão e na massa específica no estado fresco. Ao analisar o desempenho do compósito em relação ao indicado pela GRCA (*Glassfibre Reinforced Concrete Association*) para um compósito GFRC, observou-se que os desempenhos mecânicos estão entre os limites pré-estabelecidos. Com os resultados, foi possível avaliar a influência da fibra de vidro do tipo AR em uma matriz cimentícia, entendendo nas proporções utilizadas na pesquisa experimental, que a fibra de vidro do tipo AR deve ser utilizada junto com outro material que proporcione o reforço mecânico principal da matriz cimentícia.

Palavras chave: GFRC; Concreto reforçado com fibra; Fibra de vidro AR; Compósitos cimentícios; Painel de fechamento.





## ABSTRACT

Concrete is a cementitious material and has mechanical properties that make it one of the most used structural materials in the world. Within this context, there is glass fiber reinforced concrete - GFRC, where it leads to the addition of fiberglass, in order to improve the mechanical performance of the composite. Although such material has already been studied, its use in the country is not yet consolidated, due to the lack of information that brings security to designers. The objective of this work was to evaluate the influence of the addition of fiberglass in a cementitious matrix, comparing the mechanical performance in the hardened state, such as compressive strength, flexural strength and modulus of elasticity. In the fresh state, the density and slump were compared. Two mixtures were prepared that would meet the needs of a closing panel, both in terms of rebate and mechanical performance. One of the traces was performed without the addition of fiber and another with the addition of glass fiber of the AR type (alkali resistant), in the proportion of 1% on the weight of the cement, in order to verify its influence on the composite. The water/binder ratio was the same in the mixtures, so that the only variable was the addition of fiberglass. Based on the results obtained, it was possible to identify that the addition of glass fiber influenced the slump, being 12.5% lower compared to the reference, as well as the compressive strength, where the composite with the addition of glass fiber had a 6% higher mechanical strength. However, no variation was observed in the tensile strength, flexural strength and specific mass in the fresh state. When analyzing the performance of the composite in relation to that indicated by the GRCA (Glassfibre Reinforced Concrete Association) for a GFRC composite, it was observed that the mechanical performances are within the pre-established limits. With the results, it was possible to evaluate the influence of AR-type glass fiber in a cementitious matrix, understanding in the proportions used in the experimental research, AR-type glass fiber must be used together with another material that provides the main mechanical reinforcement of the cement matrix.

Keywords: GFRC; Fiber Reinforced Concrete; Glass fiber AR; Cements composites; Closing panel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Registro fotográfico das fibras de vidro utilizadas na pesquisa.....	18
Figura 2 - fachada com painéis de GFRC, edifício de estacionamento da ULBRA em canoas.....	21
Figura 3 – Modelo de ruptura de uma fibra em uma matriz cimentícia.....	21
Figura 4 - Comportamento das fibras "tipo ar" e "tipo e" em matriz cimentícia alcalina em processo de degradação.....	29
Figura 5 - Fibras de polipropileno em monofilamentos para utilização em matrizes cimentícias .....	31
Figura 6 - Fibra de polipropileno em multifilamentos para matrizes cimentícias .....	31
Figura 7 - Fibras de aço em multifilamentos.....	32
Figura 8 - Fibras de polipropileno monofilamento (A) e multifilamento (B).....	33
Figura 9 - Fibra de poliamida.....	33
Figura 10 - Fibras naturais de Açai (A) e Curauá (B) .....	34
Figura 11 - Fibras minerais de basalto (A) e asbesto (B) .....	34
Figura 12 - Fibra de vidro tipo AR .....	35
Figura 13 - Modelo de ruptura de uma matriz reforçada com fibra no sentido longitudinal .....	41
Figura 14 – Representação esquemática da curva tensão-deformação do material compósito.....	42
Figura 15 - Processo de fissuração múltipla e curva resultante em um compósito composto por uma matriz frágil reforçado por fibras .....	43
Figura 16 - Curva tensão-deformação materiais compósitos a depender do volume de fibras .....	44
Figura 17 - Concreto reforçado com fibra de vidro sem a compatibilidade entre agregado graúdo e tamanho da fibra .....	45
Figura 18 - Concreto reforçado com fibra de vidro com a compatibilidade entre agregado graúdo e tamanho da fibra .....	46
Figura 19 - Módulo de ruptura e limite de proporcionalidade após 28 dias .....	48
Figura 20 - Método proposto para o desenvolvimento da pesquisa .....	58
Figura 21 - Gráfico de distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	61
Figura 22 - Etapas do processo de mistura do compósito .....	67
Figura 23 – Teste de abatimento com tronco de cone com concreto sem fibra .....	69

Figura 24 - Moldagem de corpos de prova cilíndricos.....	69
Figura 25 - Moldagem de corpos de prova prismáticos.....	70
Figura 26 - Teste de abatimento de tronco de cone com GFRC.....	71
Figura 27 - Processo de cura inicial dos corpos de prova cilíndricos.....	72
Figura 28 - Processo de cura inicial dos corpos de prova prismáticos.....	72
Figura 29 - Determinação de massa específica fresca.....	73
Figura 30 – Resistência à compressão das matrizes cimentícias com e sem a adição de fibra de vidro aos 7 e 28 dias. ....	78
Figura 31 - Correlação da resistência com o consumo de cimento por MPa.....	80
Figura 32 - Resistência à tração por compressão das matrizes cimentícias com e sem a adição da fibra de vidro AR aos 28 dias. ....	81
Figura 33 - Resistência à tração por consumo de fibras por m <sup>3</sup> da pesquisa experimental comparado à literatura. ....	83
Figura 34 - Resistência à tração por flexão pelo consumo de fibras por m <sup>3</sup> da pesquisa experimental e literatura. ....	86
Figura 35 – Módulo de deformação sem a adição de fibra de vidro AR aos 28 dias.	87
Figura 36 - Módulo de deformação sem a adição de fibra de vidro AR aos 28 dias.	87
Figura 37 - Módulo de deformação com a adição de fibra de vidro AR aos 28 dias.	88
Figura 38 - Módulo de deformação com a adição de fibra de vidro AR aos 28 dias.	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das fibras e das matrizes cimentícias .....	30
Tabela 2 - Principais características das fibras de vidro .....	36
Tabela 3 - Composição química das fibras de vidro.....	36
Tabela 4 - Resistência à compressão do cimento CP II F40.....	60
Tabela 5 - Propriedades do cimento CP II F40 .....	60
Tabela 6 - Análise granulométrica do arenito .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 7 - Massa específica da areia.....	62
Tabela 8 - Características físicas e químicas da sílica ativa .....	63
Tabela 9 - Propriedades do superplastificante .....	63
Tabela 10 – Características químicas da água .....	64
Tabela 11 - Propriedades da fibra de vidro .....	64
Tabela 12 - Composição química fibra de vidro .....	65
Tabela 13 - Traço compósito GFRC.....	66
Tabela 14 - Determinação do abatimento da pesquisa experimental comparada à literatura. ....	75
Tabela 15 – Consumo de água e dosagem de superplastificante da pesquisa experimental e literatura. ....	76
Tabela 16 - Determinação de massa específica fresca da pesquisa experimental e da literatura .....	76
Tabela 17 - Massa específica de um GFRC conforme a GRCA. ....	77
Tabela 18 – Tabela de resistência à compressão axial das amostras da pesquisa experimental aos 7 e 28 dias.....	77
Tabela 19 - Comparativo de desempenho contra as referências – resistência à compressão.....	79
Tabela 20 – Resistência à compressão mínima para GFRC conforme a GRCA .....	80
Tabela 21 - Resistência à tração com 28 dias.....	81
Tabela 22 - Comparativo de desempenho com referências - resistência à tração por compressão.....	82
Tabela 23 - Resistência à tração por compressão mínima para GFRC conforme a GRCA.....	83
Tabela 24 - Resistência à tração por flexão da pesquisa experimental com e sem a adição de fibra de vidro aos 28 dias.....	84

Tabela 25 - Comparativo de desempenho com as referências - resistência à tração por flexão.....	85
Tabela 26 - Resistência à tração por flexão mínima para GFRC conforme GRCA. ...	86
Tabela 27 - Módulo de deformação secante das amostras da pesquisa experimental com e sem fibra de vidro aos 28 dias.....	89

## LISTA DE SIGLAS

A/Ag - Relação água aglomerante

A/C - Relação água/Cimento

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - *American Concrete Institute*

BOP - *Bend over point* - Tensão de primeira fissuração

BRE - *Building Research Establishment*

BSI - *British Standards Institution* – Instituto Britânico de Normas

Ca(OH)<sub>2</sub> - Hidróxido de cálcio

CCC - *Chichibu Cement Company*

CP II F 40 - Cimento *Portland* composto do tipo II com adição de filler e resistência de 40 MPa

CP III - Cimento *Portland* composto do tipo III, com adição de escória de alto forno

CP IV - Cimento *Portland* composto do tipo IV, com adição de pozolana

CP V ARI - Cimento *Portland* de alta resistência inicial

CRF/FRC - Concreto reforçado com fibra

CRFV - Concreto reforçado com fibra de vidro

CSH - Silicato de cálcio hidratado

FRC - *Fiber reinforced concrete* - Concreto reforçado com fibra

GFRC/GRV - *Glass fiber reinforced concrete* - Concreto reforçado com fibra de vidro

GRCA – *Glassfibre reinforced concrete association* - Associação de concreto reforçado com fibra de vidro

MEF - Modulo de elasticidade na flexão

Modelo ACK - Aveston Cooper Kely

MOR - *Modulus of rupture* - módulo de ruptura

MPa - Mega Pascal - unidade de medida para tensão

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

NEG - *Nippon Electric Glass*

NM - Norma Mercosul

PEL - *Proportional elastic limit*- limite de elasticidade

PRÉMIX GFRC – Pré-mistura – Método de mistura do GFRC qual a fibra é misturada com todos os materiais do compósito

PVA - Poliaceto de Vinila

Spray-Up GFRC – Método de mistura do GFRC qual a fibra é adicionada no momento da projeção do compósito

UTS - *Ultimate tensile strength* - resistência à tração

ZrO<sub>2</sub> - Dióxido de Zircônio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	CONTEXTO .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	22
1.3	JUSTIFICATIVA .....	22
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	24
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>26</b>
2.1	MATERIAIS CIMENTÍCIOS .....	26
2.2	FIBRAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	28
2.2.1	FIBRAS UTILIZADAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	32
2.3	MATERIAIS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS .....	37
2.3.1	ADENSAMENTO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS COM FIBRAS .....	38
2.3.2	DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	39
2.4	CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (GFRC) .....	46
2.4.1	MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE PEÇAS DE GFRC .....	48
2.4.2	DESEMPENHO MECÂNICO E FÍSICO DO GFRC .....	51
2.4.3	DURABILIDADE DOS COMPÓSITOS DE GFRC .....	52
2.5	PAINÉIS PRÉ FABRICADOS DE FECHAMENTO .....	54
2.5.1	PRODUÇÃO PRÉ-FABRICADA .....	56
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>58</b>
3.1	MATÉRIAS PRIMAS .....	59
3.1.1	CIMENTO PORTLAND .....	59
3.1.2	AGREGADO MIÚDO .....	60
3.1.3	ADIÇÃO POZOLÂNICA .....	62
3.1.4	SUPERPLASTIFICANTE .....	63
3.1.5	ÁGUA .....	63
3.1.6	FIBRA DE VIDRO .....	64



3.2	MÉTODO .....	65
3.2.1	DOSAGEM .....	65
3.3	MISTURA DO COMPÓSITO .....	67
3.4	ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO .....	73
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
4.1	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....	75
4.1.1	DETERMICAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO ..	76
4.2	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	77
4.2.1	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FIBRA DE VIDRO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS TESTADOS .....	77
4.2.2	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FIBRA DE VIDRO NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO .....	81
4.2.3	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FIBRA DE VIDRO NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	83
4.2.4	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FIBRA DE VIDRO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE .....	87
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentado primeiramente o contexto no qual a pesquisa foi desenvolvida, depois serão descritos os objetivos desejados com o estudo, seguido pela justificativa do trabalho e finalizado com a descrição da organização do trabalho em capítulos.

### 1.1 CONTEXTO

Os compósitos cimentícios, de maneira geral, são materiais que apresentam a resistência à tração e a capacidade de deformações bem inferiores em relação à sua respectiva resistência à compressão, em torno de 10%. Tradicionalmente, para corrigir estas deficiências, são empregados em conjunto com barras de aço, constituindo o material compósito amplamente utilizado na construção civil, denominado concreto armado e argamassa armada (LAMEIRAS, 2007). Para elementos de fachadas arquitetônicas, onde muitas vezes são projetados elementos esbeltos, aliados a formas geométricas irregulares, torna-se difícil a utilização do concreto armado, devido ao aço precisar de um cobrimento mínimo de proteção, conforme recomendação da ABNT NBR 12655:2022, além das limitações devido ao manuseio, para peças não lineares. Por este motivo, estudam-se alternativas para reforçar a matriz cimentícia, como a adição de fibras (GUIMARÃES, 2016).

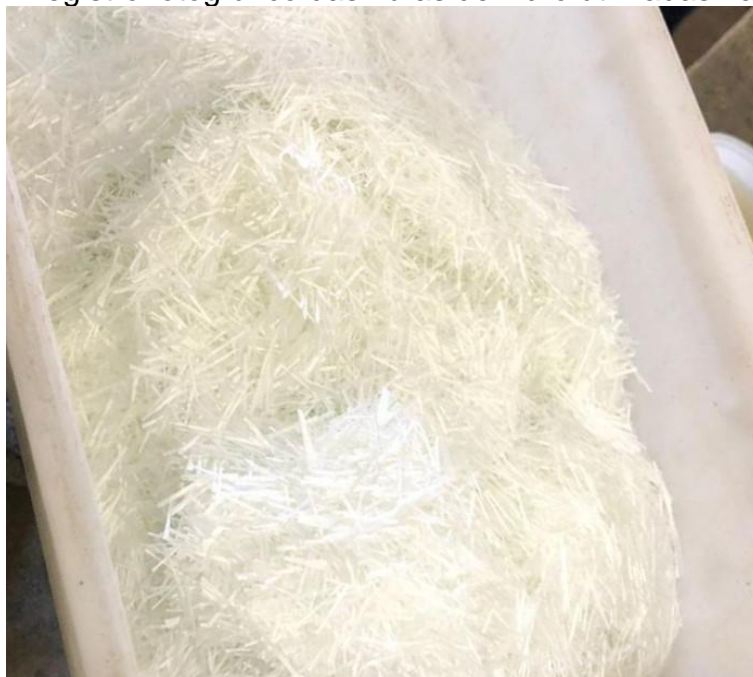
A necessidade de se respeitar o cobrimento mínimo em peças de concreto armado está relacionada à durabilidade da estrutura, sendo a corrosão dos metais da armadura, o principal fator a ser evitado. Isto ocorre, normalmente, pela ação de agentes agressivos, sendo que os principais são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), os íons cloretos e sulfatos. Desta maneira, quanto maior o cobrimento do concreto, maior a dificuldade na inicialização do processo de corrosão das armaduras, devido à dificuldade de difusão em maiores espessuras (TORRES, 2011).

O cobrimento deve proteger todas as barras de aço, devendo ser medido a partir da barra mais próxima à superfície da peça, considerando inclusive os estribos e as armaduras construtivas (FUSCO, 1995). Em locais em que o cobrimento não é feito corretamente, a corrosão progressiva pode causar tensões que geram fissuras e deslocamentos no material e que geralmente acompanham a direção da armadura principal (TAKATA, 2009).

Os GFRC (*Glass fiber reinforced concrete*) são materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro. Trata-se da utilização de fibras de vidro dispersas no concreto como reforço, com a finalidade de aumentar a resistência à tração e à flexão. Hilles (2019) observou que a adição das fibras de vidro melhorou as propriedades mecânicas do concreto, como a resistência à tração e a resistência à flexão. No entanto, conforme estudado por Lameiras (2007), pelo método de envelhecimento acelerado, as fibras tenderam a deteriorar com o envelhecimento do concreto, afetando as suas propriedades, e tendo uma perda de 36% de sua resistência à flexão. Devido a isso, é importante avaliar a reação de fibras de vidro com os álcalis do cimento, pois pode afetar a sua durabilidade.

As fibras são elementos em forma de filamentos que apresentam um elevado comprimento em relação à sua dimensão transversal, conforme ilustrado na Figura 1. O principal objetivo da utilização da fibra consiste em reforçar a matriz cimentícia, para controlar as trincas e mudar o comportamento pós fissuração, retardando o surgimento da primeira fissura e distribuindo as tensões pelo compósito. Além da tendência em provocar um aumento da resistência à compressão do compósito, as fibras também proporcionam melhorias da tenacidade à flexão conforme demonstrado por Kharitonov (2016), provocando um aumento na deformação até a ruptura de aproximadamente 49%.

Figura 1 - Registro fotográfico das fibras de vidro utilizadas na pesquisa



Fonte: Autor (2022)

As fibras geralmente utilizadas na construção civil podem ser de origem sintética ou natural (minerais ou vegetais). As fibras sintéticas são produzidas a partir de resinas derivadas do petróleo, conforme Romero (1995), para atender um desempenho específico, por exemplo, as fibras de polipropileno, PVA (poliacetato de vinila), poliéster, náilon e o acrílico. As fibras naturais vegetais são extraídas da natureza, podendo ser oriundas dos caules, flores ou frutas, como por exemplo, as fibras de coco, bananeira, bambu e curauá. Já as fibras naturais minerais, por sua vez, têm origem em rochas com estrutura fibrosa, como por exemplo, as fibras de vidro, basalto e asbesto.

A utilização de fibras para reforço em matrizes vem do período Babilônico, onde eram utilizados entrançados de palha para reforçar as matrizes betuminosas. Já a palha e a crina do cavalo eram utilizadas para reforçar tijolos de barro há pelo menos 5000 anos (ASHBY e JONES, 1998). De acordo com o ACI *Committee 544* (2018), o capim era utilizado para reforçar blocos cerâmicos secos ao sol e as crinas dos cavalos eram utilizadas para reforçar as argamassas e as pastas. Ainda assim, as fibras só começaram a ser utilizadas em escala comercial em 1898 com o avanço das pesquisas da fibra de amianto – oriundo do asbesto.

Desde o início da década de 1970, compósitos GFRC, têm se mostrado comercialmente viáveis para utilização como material de construção (LAMEIRAS, 2007). Os primeiros anos do desenvolvimento se deram na Inglaterra, a *United Kingdom Building Research Establishment* (BRE), construiu protótipos de vários produtos, entre eles painéis de fachadas, tubos e esquadrias já com as fibras de vidro do tipo AR (álcali resistente) (MAJUMDAR e LAWS, 1991). Entretanto, de acordo com a GRCA (*International Glassfibre Reinforced Concrete Assosiation*, 2018), cerca de 80% de todo o GFRC produzido no Estados Unidos é para painéis de fachada pré-fabricados.

Lameiras (2007) citou a necessidade de entender mais sobre o desempenho mecânico do compósito durante sua vida útil, tanto com diferentes tipos de agregados, cimentos, quanto com possíveis variações de temperatura, entendendo as influências no compósito.

Conforme Boggio (2000), um mesmo tipo de concreto, dosado em diferentes regiões do Brasil, precisa ser adaptado, devido à variedade de agregados que existem no país, bem como também os tipos de cimentos disponíveis em cada região. Em razão das diferentes características locais dos materiais constituintes do GFRC, utilizados nas diversas cidades brasileiras, principalmente do cimento Portland e das adições minerais (escórias de alto-forno, cinza volante, cinza de casca de arroz, Metacaulim, sílicas ativas,

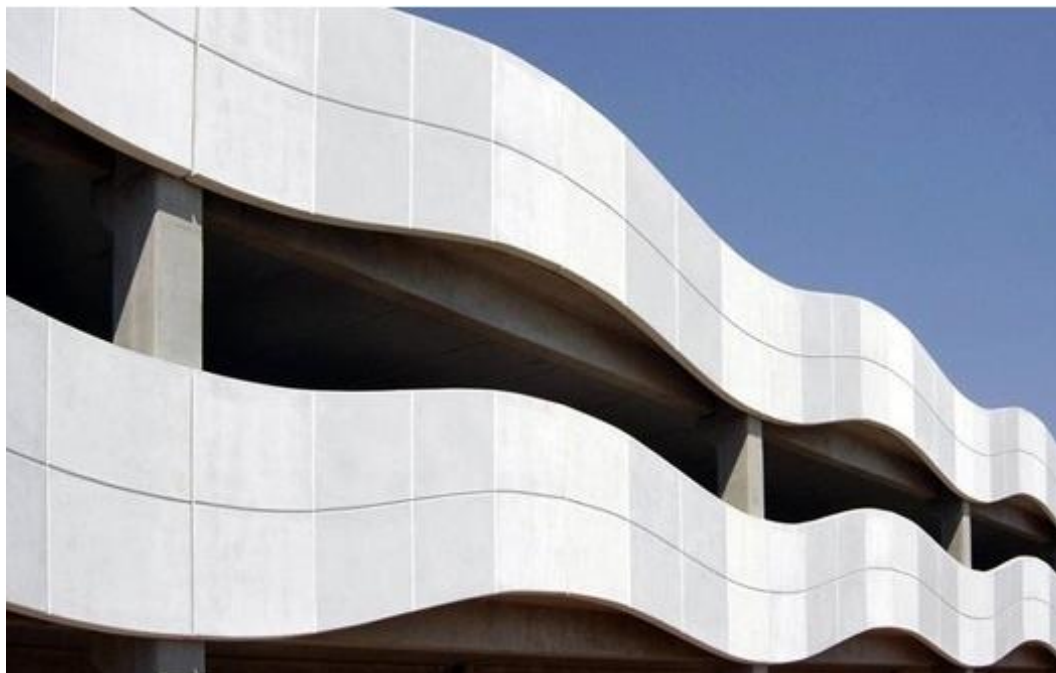
dentre outros), há a necessidade de que sejam desenvolvidas pesquisas de caráter local, com o intuito de se conhecer o comportamento do compósito, possibilitando a otimização do GFRC com relação ao tipo e à proporção dos materiais constituintes (LAMEIRAS, 2007).

As fibras de vidro do tipo E foram as primeiras a serem estudadas no início da década de 1960 com Biryukovich, mas pesquisadores da BRE observaram que fibras de vidro que continham dióxido de zircônio em sua composição eram quimicamente mais estáveis em soluções alcalinas (BENTUR e MINDESS, 2007). De acordo com a GRCA (2018), as fibras do tipo E são fibras de Borossilicato, usadas comumente para reforços poliméricos, mas não recomendadas para reforços de matrizes cimentícias, pois reagem com os álcalis do cimento, perdendo suas características mecânicas.

De acordo com Lameiras, (2007), mesmo com fibras do tipo AR, é importante avaliar a durabilidade, principalmente, em ambientes úmidos. Bentur e Mindess (2007), apontaram que, ao menos parcialmente, o processo de degradação das propriedades mecânicas dos GFRCs em ambientes úmidos se dá devido à densificação da interface entre as fibras e a matriz e do espaço entre os filamentos de um feixe de fibras, pelos produtos de hidratação do cimento. Com dados que permitam dimensionar com maior precisão e confiabilidade as peças de GFRC e, havendo uma maior previsibilidade das mudanças que podem ocorrer nas propriedades do material com o seu envelhecimento, o GFRC poderá ganhar a confiança dos engenheiros e arquitetos que especificam os sistemas a serem utilizados (LAMEIRAS, 2007).

De acordo com Serra, Ferreira e Pigozzo (2005), os pré-fabricados são vantajosos, pois diminuem o desperdício de material desde a moldagem até a execução e aumentam a produtividade da construção. O GFRC pode também ser classificado como pré-moldado, pois, é produzido e posteriormente enviado à obra para montagem. Quando comparado ao concreto convencional, apresenta maior facilidade para a confecção de peças fora do formato retangular tradicional, conforme é visto na Figura 2.

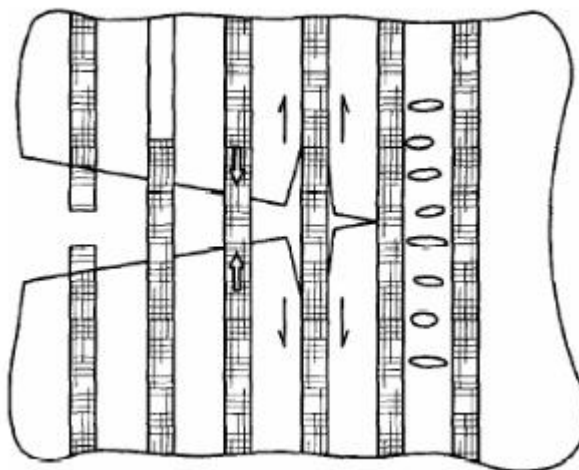
Figura 2 - fachada com painéis de GFRC, edifício de estacionamento da ULBRA em canoas



Fonte: Enfoque (2005)

No GFRC, a principal característica da fibra é o reforço da matriz cimentícia e a distribuição das tensões. Isso ocorre, pois, este material tende a retardar o surgimento da primeira fissura e distribui as tensões de forma a originar um maior número de fissuras menos visíveis (BENTUR e MINDESS, 2007), conforme é visto na Figura 3. Dessa maneira, a fibra proporciona um aumento na tenacidade à flexão do compósito, provocando um aumento da deformação pré-ruptura.

Figura 3 – Modelo de ruptura de uma fibra em uma matriz cimentícia



Fonte: Zollo (1997)

## 1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar o desempenho mecânico do concreto reforçado com fibra de vidro (*glass fiber reinforced concrete*, GFRC), para painéis de fechamento pré-fabricados.

Como objetivos específicos da pesquisa:

- avaliar os processos construtivos existentes na área de pré-fabricados, potencialmente aptos ao emprego do GFRC a partir de uma revisão bibliográfica;
- selecionar amostras de agregados, adições e aditivos, para desenvolvimento de traço de GFRC;
- avaliar a resistência à compressão, tração indireta, tração na flexão, módulo de elasticidade, abatimento e massa específica do GFRC comparando ao compósito sem fibras desenvolvido como referência;
- avaliar os resultados, correlacionando-os com as recomendações pela GRCA para um GFRC.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O concreto simples, sem aço, possui característica frágil, com resistência à tração na ordem de 10% da compressão. Por este motivo, a depender da sua utilização, é adicionada em sua composição um material dúctil, como o aço, formando assim o concreto armado. Sua adição, proporciona vantagens e desvantagens, uma das principais patologias envolvendo o concreto armado é a corrosão, que pode ocorrer em presença de umidade. De acordo com Haque e Kawamura (1992), a principal causa da corrosão das armaduras em matriz cimentícia, é devido a perda de eficiência do concreto de cobertura, uma vez que este deve proporcionar proteção necessária contra penetração de agentes agressivos que possam desencadear a despassivação das armaduras.

GFRC é utilizado para a produção de componentes esbeltos, que podem assumir uma forma relativamente simples, tais como painéis planos ou nervurados. De acordo com Guimarães (2016), entre as principais vantagens do GFRC, está a possibilidade de não desencadear corrosão, nos compósitos onde é empregado apenas a fibra de vidro como reforço.

É importante compatibilizar a dosagem da fibra com o desempenho que se espera do compósito, nos estudos atuais, vê-se que o desempenho do compósito está atrelado à dosagem de fibra de vidro utilizada, como nos estudos de Kharitonov (2016), onde se utilizou dosagens de fibra de vidro de 1,5 % e 2,5 % em relação ao peso do cimento, Ali (2019) utilizando a dosagem de 0,75 % de fibra de vidro, Hilles (2019), utilizando a dosagem de 1,2 % de fibra de vidro, entre outros. De acordo com Hashempour, Heidari e Jounaghani (2020), as adições de fibras de vidro acima de 5% da quantidade de cimento, podem levar a problemas técnicos, como empacotamento e diminuição da trabalhabilidade, pois a quantidade de fibra não consegue se dispersar na matriz cimentícia, resultando na redução da resistência mecânica e da tenacidade do concreto.

No Brasil, existe uma resistência à substituição do método convencional para o fechamento de fachadas, realizado em alvenaria de blocos. Esta resistência se deve a pouca oferta de mão de obra especializada e a carência de estudos técnicos e normatizações de sistemas inovadores, como os painéis pré-fabricados em GFRC (GUIMARÃES, 2016).

Ainda, de acordo com Bentur e Mindess (2007), existem certas aplicações nas quais o reforço com fibras de vidro é melhor do que as barras convencionalmente utilizadas, dentre as quais podem ser citadas:

- elementos de pequena espessura, onde as fibras atuam como reforço principal, elevando a resistência e a ductilidade do compósito;
- componentes projetados para suportarem cargas ou deformações, tais como os revestimentos de túneis, estruturas resistentes a explosões ou pilares pré-fabricados que serão cravados por percussão no solo;
- componentes onde as fibras são adicionadas com o intuito principal de promover o controle da fissuração induzida pelas variações de umidade ou temperatura, tais como em lajes, telhados ou elementos de pavimentação.

Entretanto, é importante reforçar que a adição de fibra em materiais cimentícios não elimina a necessidade de utilização de barras de aço contínuas. Lameiras (2007), expôs que a não ser no caso das peças de pequenas espessuras, onde as fibras são utilizadas para elevar a resistência mecânica do material cimentício é necessário um reforço com barras contínuas.



O GFRC aplicado nos painéis de fachada é um produto com potencial de crescimento na construção civil, pois pode propiciar às construtoras uma alternativa ao fechamento de alvenaria convencional, de acordo com Guimarães (2016), frente à alvenaria convencional, o GRC pode agregar beleza, qualidade e velocidade na instalação. Tudo isso devido a sua pré-fabricação, que permite projetar e executar o produto com maior controle de qualidade, além disso, os painéis pré-fabricados em GFRC podem conter isolantes térmicos e acústicos, conforme as condicionantes de projeto.

De acordo com Ortenzi (2007), é necessária a redução dos volumes ocupados e aumento dos espaços úteis nas construções, devido à redução dos espaços das construções, o que motiva as pesquisas por materiais que permitam obter resultados eficientes com desempenho similar ou superior aos tradicionais, ou que permitam a utilização conjunta com esses, melhorando as suas características mecânicas.

Portanto, o GFRC incorporado em painéis de fechamento, proporciona potencial redução do tempo de instalação devido ao sistema de pré-fabricados, além da diminuição do desperdício e da possibilidade de ser executado com espessuras menores que o tradicional. O estudo do GFRC permite analisar um material com desempenho mecânico superior ao concreto tradicional, entender as possíveis destinações para este compósito e relacionando seu desempenho em um elemento pré-fabricado que já é utilizado na construção civil.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, e após o término destes, estão as referências bibliográficas. A seguir uma breve explanação sobre o conteúdo presente em cada capítulo.

No Capítulo 1 está apresentada a introdução, na qual discute-se o contexto histórico e o tema do trabalho, seguido pela descrição dos objetivos, a justificativa do desenvolvimento desta pesquisa e esta organização exposta.

Na sequência, está abordada a fundamentação teórica dos materiais envolvidos na pesquisa, contendo conceitos que abrangem desde os materiais cimentícios e as fibras individualmente até os compósitos com a adição das fibras, com um enfoque principal na adição de fibras de vidro. Neste item, também está abordado o estado da arte, apresentando as conclusões de pesquisas recentes sobre os temas. Na última parte

deste capítulo estão descritas as principais características dos painéis de fechamento, detalhes de sua produção e apresentadas as normativas referentes aos desempenhos mecânicos mínimos a serem atingidos para a aplicação.

O terceiro capítulo descreve e caracteriza todos os materiais utilizados no estudo experimental e as metodologias de dosagem, para a execução dos ensaios de laboratório, de acordo com as normas vigentes.

Os resultados obtidos nos ensaios foram expostos no capítulo 4, correlacionados com resultados da literatura técnica, avaliando a influência da adição da fibra de vidro na matriz cimentícia.

Nos dois últimos capítulos deste trabalho, foram dissertadas as conclusões obtidas no decorrer da pesquisa, o atingimento dos objetivos propostos e são sugeridos temas de abrangência para futuros trabalhos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE

Neste item estão apresentadas as teorias e as referências utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa, juntamente com resultados recentes encontrados em artigos pertinentes ao tema.

### 2.1 MATERIAIS CIMENTÍCIOS

De acordo com Figueiredo (2011), os materiais cimentícios são produtos que tem como base o cimento Portland, podendo ser divididos em três grupos: pasta (cimento e água), argamassa (cimento, água e agregado miúdo) e concreto (cimento, água, agregado miúdo, agregado graúdo e adições).

O cimento é um dos principais componentes do GFRC, e é importante que ele seja armazenado corretamente. O cimento deve ser mantido seco, o ar úmido pode ser tão prejudicial quanto a umidade direta. Quando armazenado à granel em um silo, será satisfatório até cerca de 3 meses, mas em sacos de papel tradicionais, mesmo armazenado em boas condições, pode perder cerca de 20% de sua resistência após 4 a 6 semanas. Portanto, o cimento ensacado deve ser usado logo após a chegada e por ordem de idade (GRCA, 2018).

O cimento é caracterizado como um aglomerante hidráulico, ou seja, é um material que, quando em contato com a água, inicia o processo de hidratação (ORTENZI, 2007). Conforme Mehta e Monteiro (2014), o cimento Portland é composto por, basicamente, quatro componentes: Silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), e ferro-aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ). Os silicatos de cálcio influenciam, principalmente, na resistência à compressão. O  $C_3A$  tem uma maior influência nas primeiras idades. Depois de 7 dias o  $C_2S$  começa a reagir, desde que se mantenha a cura do concreto, conforme descrito nos procedimentos da ABNT NBR 6118:2014. Tanto o silicato tricálcico quanto o silicato bicálcico incrementam a resistência à compressão devido ao resultado de sua reação química que, em contato com a água, forma o silicato de cálcio hidratado, que é comumente chamado de gel C-S-H, mais o hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ). O gel C-S-H é o mais importante composto na reação, porque é o cristal que vai proporcionar a resistência à matriz cimentícia (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Após a hidratação do cimento, forma-se uma interface entre o agregado graúdo e a pasta, tanto maior quanto foi maior a quantidade de água ali retida. Essa interface, chamada zona de

transição, é responsável, em parte, pelo início dos processos de ruptura, por ser a região mais fraca da pasta (ORTENZI, 2007).

Entre as principais vantagens do concreto, pode-se listar o baixo custo quando comparado à materiais metálicos, por exemplo, e a capacidade de se adequar a variadas condições de produção, além de possibilitar variações de formato para as peças moldadas, como por exemplo, lajes, pisos, vigas, pilares e painéis. (FIGUEIREDO, 2011). Elementos de concreto tradicionalmente possuem formatos retangulares, devido a utilização da armadura metálica, que é constituída por barras de aço.

Cada concreto necessita de um método de dosagem que atenda às demandas necessárias definidas em projeto, como resistências à tração, à flexão, à compressão e à durabilidade. Também necessita atender características de execução, como fluidez e tempo de trabalhabilidade, além de aspectos estéticos como acabamento. Um dos pontos atuais que mais se destaca é o custo ideal do concreto. Os concretos especiais possuem um custo mais alto devido às características que eles atendem. De acordo com Helene (2005), a oferta do tipo de concreto ideal é acompanhada por uma série de métodos de dosagem ao menor custo possível.

De acordo com Guimarães (2016), existem duas definições dentro do termo agregado para materiais cimentícios, o agregado graúdo e o miúdo. O termo agregado graúdo se refere ao material que fica retido na peneira nº 4, que tem abertura de 4,75 mm. Já o agregado miúdo é a partícula que está entre a peneira nº 4 e nº 200 (75µm). De acordo com a GRCA (2018), “Para GFRC fabricado pelo método de spray, o tamanho máximo de partícula é geralmente limitado a 1,2 mm; GFRC fabricado pelo método *premix*, o tamanho máximo de partícula pode ser de apenas 2,4 mm”.

De acordo com a ABNT NBR 7211:2009, que determina os parâmetros para utilização de agregados em concreto e argamassa, matrizes cimentícias que utilizam agregados com diâmetro inferior à 4,75 mm, ou seja, somente agregados miúdos, são classificados como argamassa, enquanto no concreto são utilizados agregados miúdos e graúdos, ou seja, com diâmetro inferior e superior à 4,75 mm.

Entretanto, autores tratam matrizes cimentícias reforçadas com fibra, mesmo com diâmetro máximo inferior a 4,75 mm, de microconcreto. Branch (2018), Lima (2019) e Etxeberria (2020) descrevem em suas pesquisas, que mesmo podendo ser caracterizada como argamassa, tais matrizes cimentícias se encaixam mais nas características mecânicas de concreto do que de argamassas.

## 2.2 FIBRAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

A utilização de fibras em concretos e argamassas em escala comercial começou a partir do ano de 1898, com a invenção do processo Hatshek, para a aplicação das fibras de amianto em uma pasta de cimento (ACI COMMITTEE 544, 2018). Com isso, foi possível a utilização em larga escala de fibras de amianto para reforço de matrizes cimentícias e, principalmente, em peças de pequenas espessuras, como telhas, e caixas da água.

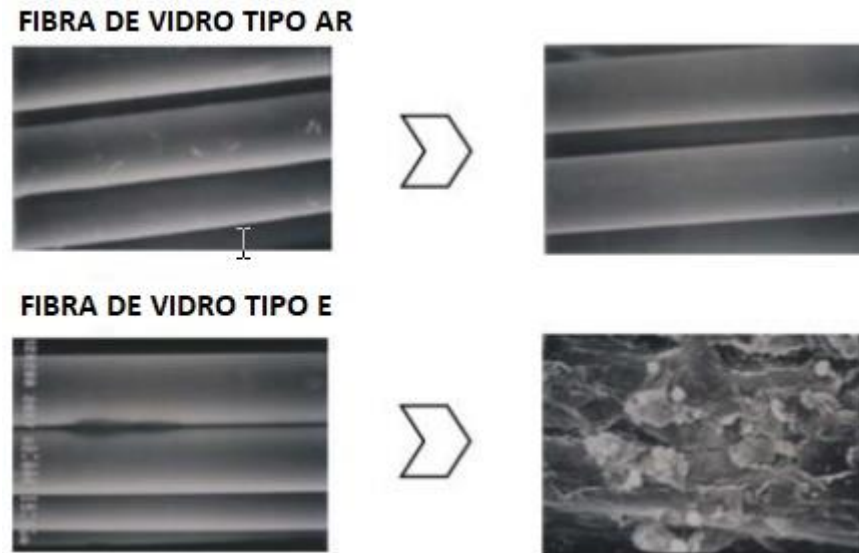
De acordo com Majumdar e Laws (1991) os primeiros estudos com fibra de vidro são da década de 1950, na Europa, logo após a expansão da indústria de polímeros. Na década de 60 com Biryukovich, apareceram os primeiros resultados de estudos de fibras de vidro em matrizes frágeis. O GFRC se enquadra dentro de um grupo que se chama *Fiber Reinforced Concrete*, FRC ou Concreto reforçado com fibras, CRF. Os principais tipos de fibras utilizadas no CRF são: vidro, aço, polipropileno, nylon e aramida.

Um particular problema que precisou ser tratado no início das pesquisas com as fibras de vidro, foi a baixa resistividade alcalina, daquelas classificadas como tipo E. Essa nomenclatura refere-se ao tipo de vidro comumente utilizado para reforçar materiais poliméricos, e que foi originalmente usado para GFRC. Este tipo de fibra, deteriora-se rapidamente no ambiente altamente alcalino da matriz de cimento. Para ultrapassar este problema, as formulações de vidro resistente aos álcalis especiais (fibras de vidro AR), tiveram que ser desenvolvidas (BENTUR e MINDESS, 2007).

Conforme a GRCA (2018), a fibra de vidro AR é especialmente formulada para ter um alto grau de resistência ao ataque alcalino e durabilidade melhorada em compósitos cimentícios. As composições cimentícias são altamente alcalinas (pH 12,9 típico), o que é um ambiente agressivo para as fibras de vidro. As fibras de vidro do tipo E, usadas em reforços poliméricos, são rapidamente destruídas em ambientes alcalinos conforme é visto na Figura 4, onde foram mantidas as fibras de vidro do tipo AR e fibras do tipo E em solução alcalina de cimento, saturada por 200 horas, com uma temperatura de 80°C. A formulação especial da fibra AR, tem em particular o teor de zircônia, na proporção de 15 a 20% conforme a fabricante Owens Corning (2020). Essa característica tende a aumentar a resistência a esse ambiente agressivo. Segundo Comino (2007), no vidro tipo AR, existe da mesma forma as ligações de óxido de silício que o vidro tipo E, mas na sua superfície são incorporados adicionalmente átomos de zircônio, que se

comportam bloqueando os ânions em torno dele, evitando que as ligações hidrolisáveis sejam atacadas.

Figura 4 - Comportamento das fibras "tipo ar" e "tipo e" em matriz cimentícia alcalina em processo de degradação



Fonte: GRCA (2018)

As fibras são disponibilizadas em três classificações distintas: em microfilamentos, em manta, ou em forma de arame. As fibras em monofilamentos possuem uma alta quantidade de filamentos por kg, fibras de polipropileno podem conter 220 milhões de filamentos a cada kg, conforme Owens Corning (2020), enquanto às fibras em forma de arame por exemplo, que são filamentos únicos ou grampos. De acordo com Figueiredo (2011), as fibras em forma de arame proporcionam melhor ancoragem ao concreto, enquanto as fibras em forma de manta, são destinadas para isolamento térmico e acústico.

Segundo o ACI COMMITTEE 544 (2018), as fibras de aço são sintéticas, com variados formatos e são utilizadas no mercado mundial, tanto para reforço principal onde substituem as barras de aço, quanto para reforço secundário, onde trabalham juntamente com as barras de aço melhorando alguma característica necessária. As fibras de vidro são naturais de origem mineral, mas, são classificadas separadamente. As fibras sintéticas são produzidas com a finalidade de atender características específicas como acréscimo de resistência à tração, flexão, ou até mesmo controle de retração, as principais são: polipropileno, polietileno, nylon, carbono e aramida. As fibras naturais consistem em todas as fibras que se encontram na natureza, podendo ser de origem

vegetal ou mineral, como por exemplo: asbesto, bambu, sisal, fibra de coco, juta, entre outras. Zollo (1997) organizou as fibras de acordo com as suas principais características, comparativamente às matrizes cimentícias, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades das fibras e das matrizes cimentícias

	Material	Diâmetro equivalente (µm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Fibra	Amianto	0,1 – 50	1,9	1800	380	0,5
	Acrílico	12,7 - 104,1	1,16 - 1,18	268,9 - 999,8	13,8 - 19,3	-
	Aço	10 – 330	7,86	2100	160	3
	Aramida I	11,9	1,44	2930,4	62,1	-
	Aramida II	10,2	1,44	2344,3	117,2	-
	Carbono I	7,6	1,9	1723,7	379,9	-
	Carbono II	8,9	1,9	2620,1	230,3	1
	Nylon	22,9	1,14	965,3	5,2	13,5
	Poliéster	19,8	1,34 - 1,39	227,5 - 1103,2	17,2	-
	Polietileno	25,4 – 1016	0,92 - 0,96	75,8 - 586,1	50,0 - 117,2	-
	Polipropileno	-	0,9 - 0,91	137,9 - 689,5	3,4 - 4,8	-
	Vidro - AR	-	2,7 - 2,74	2447,7 - 2482,2	78,6 - 80,0	3,6
	Vidro - E	-	2,46 - 2,54	3102,7 - 3447,5	64,8 - 71,7	3,6
	Coco	101,6 - 406,4	1,12 - 1,15	120 – 200	19,0 - 26,0	-
	Sisal	-	-	275,8 - 568,1	13,0 - 26,0	-
	Bagaço de Cana	203,2 - 406,4	1,2 - 1,3	183,7 - 289,6	15,0 - 19,0	-
	Matriz Cimentícia	Pasta de Cimento	-	2,00 - 2,30	3,0 - 6,0	10,0 - 25,0
Argamassa		-	2,2 - 2,3	2,0 - 4,0	25,0 - 35,0	0,005 - 0,015
Concreto		-	2,3 - 2,45	1,0 - 4,0	30,0 - 40,0	0,005 - 0,015

Fonte: Adaptado de Zollo (1997), e Lameiras (2007).

Como pode ser observado na Tabela 1, a resistência à tração das fibras é 600 vezes superior à resistência à tração do concreto, usando como exemplo a fibra de vidro AR, devido à esta característica, a incorporação da fibra em uma matriz cimentícia proporciona melhor desempenho mecânico do compósito. Conseqüentemente, nos compósitos, devido à menor resistência à tração, a matriz fatura antes da resistência da fibra ser atingida (HANNANT, 1978). Conforme Figueiredo (2011), as fibras podem ser divididas em dois grupos de acordo com os seus módulos de elasticidade. Um onde as

fibras possuem módulo de elasticidade menor do que a matriz cimentícia, tais como as fibras de celulose, náilon e polipropileno; e outro constituído por fibras com módulos elevados, como é o caso das fibras de amianto, vidro, aço, carbono e aramida. De acordo com Lameiras (2007), as fibras de baixo módulo de elasticidade geralmente não são utilizadas para suportarem cargas permanentes elevadas, pois com presença de microfissuras na matriz, estas fibras tendem a sofrer alongamentos ou deflexões consideráveis ao longo do tempo.

Em relação à configuração das fibras individuais, comumente são utilizadas como reforço em matrizes à base de cimento Portland, sendo subdivididas em dois grupos, o primeiro são as fibras em monofilamentos, separadas uma das outras, conforme ilustrado na Figura 5. O outro tipo de fibras são as de multifilamentos, que são combinações geralmente constituídas por feixes, conforme a Figura 6.

Figura 5 - Fibras de polipropileno em monofilamentos para utilização em matrizes cimentícias



Fonte: Etruria (2021)

Figura 6 - Fibra de polipropileno em multifilamentos para matrizes cimentícias



Fonte: Concretoefibra (2021)



A estrutura na forma de feixe é típica de fibras produzidas industrialmente, sejam inorgânicas (vidro) ou orgânicas (carbono e aramida) e, esta, também, é a configuração típica das fibras naturais, como é o caso das fibras de amianto. As fibras constituídas por monofilamentos discretos, são dispersas em várias configurações para melhorarem a interação entre a fibra e a matriz com relação à ancoragem mecânica (BENTUR e MINDESS, 2007).

### 2.2.1 FIBRAS UTILIZADAS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Existe uma variedade de tipos de fibras, cada qual, com uma finalidade. Há, as fibras que servem para reforço estrutural e outras para o controle de retração em concreto, com variados tamanhos, tipos de filamentos, e composição. Na sequência estão descritas as principais fibras utilizadas em compósitos cimentícios.

- fibras de aço. As fibras de aço podem ser arames, trefilados, retos ou até em outros formatos e cortes (ABNT NBR 15530:2019). Proporcionam um aumento de ductilidade ao concreto, além de resistência ao impacto e à fadiga. Melhoram o controle à fissuração e, geralmente, possuem extremidades na forma de gancho para aumentar a sua ancoragem, conforme visto na Figura 7 (Figueiredo, 2011).

Figura 7 - Fibras de aço em multifilamentos



Fonte: Figueiredo (2005)

- fibras de polipropileno. As fibras de polipropileno são sintéticas podendo ser na forma de monofilamentos (Figura 8 – A) ou multifilamentos (Figura 8 – B), têm seu uso bem difundido em pisos industriais, com a finalidade de controle de fissuração. Tem como características a resistência aos álcalis, excelente

para fibras em matrizes cimentícias. Possui baixo módulo de elasticidade e fraca aderência com a matriz cimentícia (BENTUR e MINDESS, 2007).

Figura 8 - Fibras de polipropileno monofilamento (A) e multifilamento (B)



Fonte: Figueiredo (2005)

- fibras de poliamida. Mais conhecidas como de Nylon. As poliamidas podem ser encontradas na natureza, como lã e seda, e podem ser sintetizadas como o caso do Nylon. Sua forma de comercialização é em multifilamentos, como é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Fibra de poliamida



Fonte: Lyu (2020)

- fibra de aramida: As fibras de aramida são sintéticas com extrema resistência ao calor. As propriedades mecânicas das aramidas são 5 a 10% superiores do

que qualquer outra fibra sintética. O nome aramida vem da junção das palavras poliamida aromática. Altamente utilizada em aplicações militares, como em coletes balísticos, atividades espaciais e em equipamentos de combate a incêndios.

- fibras naturais: As fibras naturais podem ser vegetais ou minerais, exemplos de fibras vegetais são, açai, curauá, como é apresentado na Figura 10. As fibras vegetais apresentam a possibilidade da utilização de recursos alternativos (Tanobe, 2019), entretanto, não possuem escala industrial, pois são oriundas da natureza. As fibras naturais minerais são extraídas de rochas com estrutura fibrosa, como por exemplo, o basalto e o asbesto que são vistas na Figura 11.

Figura 10 - Fibras naturais de Açai (A) e Curauá (B)



Fonte: Tanobe (2019)

Figura 11 - Fibras minerais de basalto (A) e asbesto (B)



Fonte: Basaltcore (2021)(A) e Ferreira (2007)(B)

- fibras de vidro – tipo AR e tipo E: As fibras de vidro do tipo E foram as primeiras a serem estudadas no início da década de 1960 com Biryukovich, a fim de

encontrar um reforço em matrizes cimentícias de pequena espessura, e elevada resistência. Entretanto, notou-se que com o passar do tempo, que ocorria uma reação com os álcalis do cimento, deixando a matriz cimentícia tão frágil quanto um compósito sem fibra. As fibras do tipo AR, possuem em sua composição uma proteção de dióxido de zircônio ( $ZrO_2$ ), que protege a fibra das reações com os álcalis do cimento, conforme pode ser visto na Tabela 3 que compara as composições das fibras E, A, e AR. Estas são fibras com características de multifilamentos, conforme é visto na Figura 12.

Figura 12 - Fibra de vidro tipo AR



Fonte: Owens Corning (2020)

A origem da fibra de vidro remonta ao Egito, há mais de 4500 anos, quando foi processado o vidro em fibras, para utilização em vasos e ânforas junto aos sarcófagos dos faraós, as fibras de vidro foram utilizadas junto à cerâmica, confirmando que desde aquele tempo os egípcios já haviam descoberto as propriedades mecânicas desta adição (ORTENZI, 2007).

Entretanto, retomaram-se o desenvolvimento da fibra de vidro centenas de anos depois. Somente após a segunda Guerra Mundial e o início da corrida espacial, a fibra de vidro teve um novo redirecionamento. Com a escassez do aço e a necessidade de encontrar materiais alternativos, as pesquisas ocorreram na direção de se encontrar um material que pudesse ser associado aos polímeros plásticos, sendo capaz de estruturá-los, pois esses careciam das propriedades resistentes necessárias aos elementos estruturais, que fossem similares a materiais metálicos (MAZUMDAR 2001).

De acordo com a fabricante Owens Corning (2020), existem quatro tipos diferentes de fibras de vidro, cada uma com uma característica principal, conforme apresentado na Tabela 2. Tais diferenças de comportamento se dão devido a alterações na composição química, conforme mostrado na Tabela 3, principalmente devido a adição de  $ZrO_2$ .

Tabela 2 - Principais características das fibras de vidro

Fibra de Vidro	Características principais	Resistência química
E	Isolamento eletromagnético	Boa
AR	Álcali resistente	Ótima
S	Alta resistência mecânica/térmica	Muito boa
C	Alta resistência química	Ótima

Fonte: Owens Corning (2020).

Tabela 3 - Composição química das fibras de vidro

	Tipo A %	Tipo E %	Tipo AR % (Cem-Fil)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	73,0	55,5	62,0
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	X	X	17,30
<b>TiO<sub>2</sub></b>	X	0,10	X
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,0	13,4	0,3
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,1	0,23	0,07
<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	X	6,40	X
<b>CaO</b>	8,0	23,0	5,3
<b>MgO</b>	4,0	0,3	X
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	13,0	0,8	14,3
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,5	0,2	X

Fonte: Reyes-Araiza *et al.* (2008)

Desta forma, o que torna a fibra de vidro do tipo AR mais resistente à alcalinização, é uma menor proporção de  $SiO_2$  (dióxido de silício), somando com a adição de  $ZrO_2$  (dióxido de zircônio) que não está presente nas fibras do tipo A e E. A degradação das fibras de vidro acontece, pois, os vidros de silicatos inorgânicos (fibras dos tipos A e E – sem a adição de dióxido de zircônio) são reativos com os álcalis (presente no cimento) (MAJUMDAR e LAWS, 1991).

Essa reatividade pode possibilitar uma redução de até 10% no módulo de elasticidade de matrizes cimentícias, conforme visto por Lameiras (2007). Por esse

motivo, apenas fibras do tipo AR são recomendadas para a utilização em compósitos cimentícios.

De acordo com Metha & Monteiro (2014), o problema crítico em relação às fibras de vidro, pode ser reduzido pela adição de material pozolânico ou cinzas com alto teor de sílica ativa. Lameiras (2007) estudou a adição de sílica ativa visando minimizar o ataque dos álcalis, onde observou que com adição de 5%, teve um desempenho na resistência à tração de 16% em relação à amostra sem sílica ativa. A sílica ativa promove uma absorção maior da água livre, preenche os interstícios entre os grãos de cimento e as fibras, dispersas aleatoriamente na pasta, além de ser um material pozolânico, ter uma maior superfície específica fina, na ordem de 20.000 m<sup>2</sup>/kg (LAMEIRAS, 2007).

A fibra de vidro é disponibilizada ao mercado em: rolo, manta ou picada. As fibras em formato de rolo, *roving* são compostas por um único feixe, onde os filamentos são unidos de forma normalmente paralela, evitando-se a torção no momento de bobinagem. A vantagem das fibras *roving* é a quantidade de fibra por espaço, já que ela é distribuída em um feixe único (ORTENZI, 2007).

As mantas podem ser constituídas por fios ou picadas, com as fibras entrelaçadas para proporcionar um único material com maior área. As mantas em fios são conhecidas como (*chopped strand mats*) e as fibras picadas (*milled fibers*). Existem, também as fibras picadas (moídas), que se assemelham às mantas, mas, não são entrelaçadas, são disponibilizadas soltas. As fibras moídas são comumente utilizadas no reforço de compósitos com matrizes cimentícias (ORTENZI, 2007).

### 2.3 MATERIAIS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Os compósitos cimentícios reforçados com fibras são utilizados em aplicações onde é importante a utilização de materiais com boas resistências à tração estática ou dinâmica e que tenham elevadas capacidades de absorver energia (LAMEIRAS, 2007). Com o passar do tempo, concretos com adições de fibras têm se tornado frequentes em pisos industriais, revestimento de túneis, telhas e paredes de concreto, elementos decorativos e em painéis de fechamento.

De acordo com Majumdar e Laws (1991), um dos primeiros estudos em larga escala sobre o GFRC foi por Biryukovich na década de 1960, na antiga União Soviética. Ele realizou testes com fibras do tipo A (cal de soda) e do tipo E (borossilicato). O objetivo foi o reforço de matrizes cimentícias de pequena espessura, elevada resistência, baixa

permeabilidade e proporções térmicas. Para isso, o reforço do compósito foi superior a 50% da massa total. Logo após estes testes iniciais, em 1967 pesquisadores da *United Kingdom Building Research Establishment*, BRE, iniciaram investigações referentes à fibra de vidro do tipo AR. Foi baseado nesse trabalho que posteriormente cientistas da BRE desenvolveram a fibra de vidro com a adição de dióxido de zircônio, que mostrou alta eficiência contra os álcalis (ACI COMMITTEE 544, 2018). As primeiras produções da fibra de vidro do tipo AR foram nos anos seguintes, em 1971 a Cem-FIL, em 1973 a *Owens Corning Fiber Glass* e em 1975 a NEG (*Nippon Electric Glass*).

### 2.3.1 ADENSAMENTO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS COM FIBRAS

Após os primeiros estudos e as utilizações das fibras em geral na indústria, notou-se que a adição de fibras no concreto proporciona perda de trabalhabilidade, sendo esta redução proporcionalmente mais acentuada quanto maior o teor de fibra. Dessa forma, o processo de concretagem demandará mais tempo e na maioria dos casos, exigirá uma vibração mecânica para se adensar de maneira correta, sem prejudicar o acabamento. Em peças esbeltas, Lameiras (2007), sugeriu que quando ocorrer a adição das fibras, a perda de trabalhabilidade seja compensada com superplastificantes, que tem por característica reduzir a água da mistura.

De acordo com a GRCA (2018), o uso de aditivos, como plastificantes e superplastificantes, é incentivado, pois podem melhorar as propriedades do GRC. Aditivos de concreto especialmente formulados para fabricação de GFRC, podem ser usados conforme apropriado. Aditivos são geralmente adicionados para produzir os seguintes efeitos:

- melhorar a trabalhabilidade, sem aumentar a relação água/aglomerantes;
- melhorar a coesão;
- reduzir a segregação;
- retardar o processo de hidratação;
- acelerar o processo de hidratação.

### 2.3.2 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Figueiredo (2011) afirmou que a principal função da fibra é proporcionar uma resistência à propagação das fissuras, que possam vir a surgir na matriz do compósito. Um dos principais motivos das fissuras é a própria retração da pasta de cimento dentro da matriz. Esta retração é restringida pelos agregados que são bem mais rígidos, causando esforços de tração na pasta e sua possível fissuração.

As pastas e argamassas reforçadas com fibras são geralmente aplicadas em componentes de pequena espessura. Nessas aplicações, as fibras atuam como reforço principal e são incorporadas em teores na faixa de 5 a 20% em relação ao consumo do cimento. Nos concretos reforçados com fibras, o volume de fibra utilizado é menor do que 2% em relação ao consumo de cimento, e as fibras atuam como reforço secundário, com a finalidade de controlar a fissuração da matriz (BENTUR e MINDESS, 2007).

A incorporação de fibras de vidro, em matrizes de aglomerantes minerais, tem objetivo semelhante ao do uso de barras de aço no concreto armado, isto é, melhorar propriedades mecânicas dessas matrizes e absorver as tensões aplicadas. Diferentemente do que acontece no concreto armado, onde o posicionamento da armadura atende basicamente as regiões submetidas a tração, este reforço dá-se aleatoriamente ao longo de toda a matriz, propiciando o aumento e estabilização da tensão de fissuração da matriz, na tração e na flexão, além do aumento sensível de tenacidade do compósito, pois amplia a capacidade de suporte de carga da matriz após a sua fissuração (PROCTOR, 1990).

Nos materiais compósitos reforçados com fibras, a matriz atua como meio em que uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras, sendo que apenas uma proporção da carga aplicada é suportada pela fase matriz, ainda no estado elástico. A matriz também tem como função proteger as fibras individuais contra danos superficiais, como resultado da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente (CALLISTER JR, 2002).

Em geral, no concreto, a fissuração se inicia geralmente na matriz cimentícia, na interface com o agregado graúdo. De acordo com BENTUR e MINDESS (2007), há dois tipos de transferências de tensões entre matriz-fibra: as transferências de tensões elásticas, um mecanismo dominante antes de ocorrer qualquer tipo de fissuração na matriz e as transferências de tensões por fricção devido ao deslocamento. Na transferência por tensões elásticas, os deslocamentos longitudinais da fibra e da matriz



na interface são geometricamente compatíveis, sendo a tensão que se desenvolve na interface do tipo cisalhante, a qual é requerida para distribuir o carregamento externo entre as fibras e a matriz e, então, as deformações destes dois componentes na interface permanecem as mesmas.

A eficiência das fibras com relação à melhoria das propriedades mecânicas da matriz cimentícia é controlada pelos processos nos quais o carregamento é transferido da matriz para as fibras e pelo efeito das fibras costurarem as fissuras que se abrem na matriz, o que ocorre em um estágio mais avançado do carregamento. A compreensão destes mecanismos permite que sejam previstos os modos de fratura do compósito e servem, também, como base para o desenvolvimento de compósitos com desempenhos melhorados por meio da modificação da interação entre as fases constituintes (LAMEIRAS, 2007).

É essencial que haja uma compatibilidade física e química entre a matriz e as fibras, de forma que as forças de ligações adesivas entre estes materiais sejam mantidas. A força de ligação é uma consideração importante na escolha de uma combinação matriz-fibra. A resistência final do compósito, depende em parte da magnitude dessa ligação, sendo que uma ligação adequada é essencial para maximizar a transmissão da tensão de uma matriz fraca para as fibras mais resistentes (CALLISTER JR, 2002).

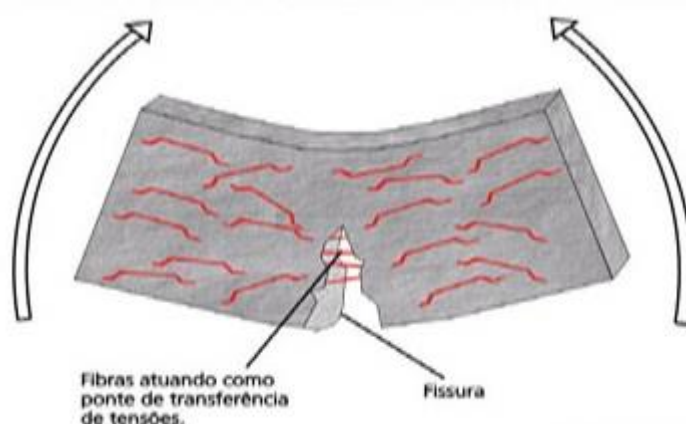
A transição da transferência de tensões elásticas para a transferência de tensões por fricção, ocorre quando a tensão cisalhante da interface, devido ao carregamento externo, ultrapassa a resistência de aderência entre estes dois materiais. Assim que esta tensão é ultrapassada, o descolamento da interface fibra-matriz é iniciado, e a tensão de cisalhamento friccional começa a atuar ao longo da interface da zona descolada. Este processo de transição entre a transferência de tensões elásticas, descolamentos, até a transferência de tensões por fricção depois do descolamento é um processo gradual, durante o qual ambos os tipos de mecanismo estão atuando (BENTUR e MINDESS, 2007).

A ocorrência de cada uma das etapas de transferência de tensões, depende da resistência de aderência entre a fibra e a matriz e da resistência à tração da matriz. Se a resistência à tração da matriz for elevada, haverá um descolamento na interface entre a fibra e a matriz quando a tensão de cisalhamento elástico ultrapassar a resistência de aderência entre os dois materiais, anteriormente à fissuração da matriz. Já, nos compósitos constituídos de matrizes com baixas resistências à tração, a fissuração

precede o descolamento da fibra com relação à matriz. Neste caso, o arrancamento da fibra se dá como resultado do avanço de uma fissura em sua direção (BENTUR e MINDESS, 2007).

As fibras atuam absorvendo energia e controlando o crescimento das fissuras da matriz por meio do mecanismo apresentado na Figura 13. Inicialmente, tem-se o processo de fissuração da matriz cimentícia, propagando as fissuras até as fibras, até o ponto que conseguem distribuir as tensões (LAMEIRAS, 2007).

Figura 13 - Modelo de ruptura de uma matriz reforçada com fibra no sentido longitudinal

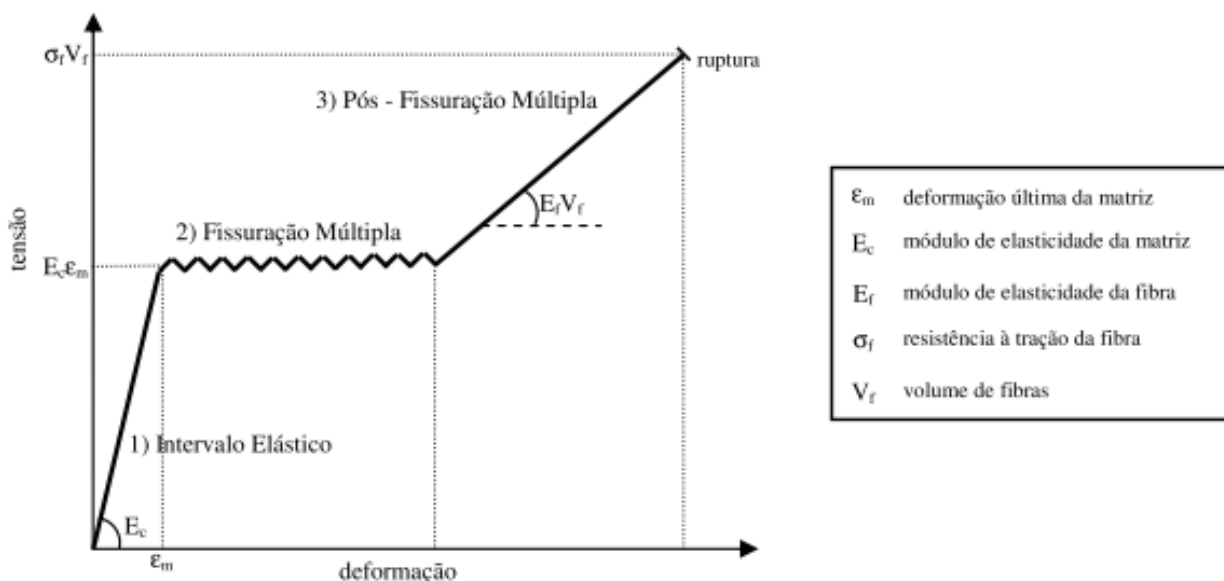


Fonte: Maccaferri (2021)

Outro modelo que ajuda a compreender o comportamento mecânico dos materiais cimentícios, reforçados com fibras curtas e dispersas em uma matriz frágil é o modelo proposto por *Aveston-Cooper-Kely* (1971).

Conforme apresentado na Figura 14, com o modelo é possível descrever o comportamento de um compósito cimentício em três estágios, por meio da curva tensão-deformação: Intervalo elástico, fissuração múltipla, e estágio pós fissuração múltipla.

Figura 14 – Representação esquemática da curva tensão-deformação do material compósito

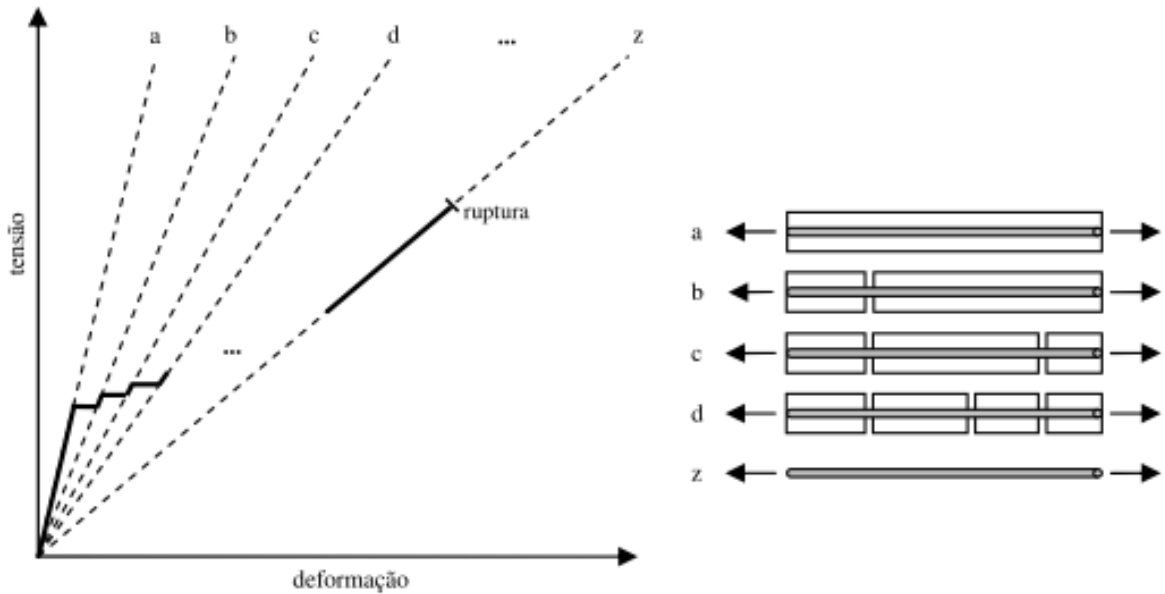


Fonte: Majumdar e Laws (1991)

O estágio elástico é o momento até a primeira fissura, no qual a fibra e a matriz trabalham juntas. A fissuração múltipla acontece quando a fissuração ocorre na matriz e a carga é transferida para as fibras. Porém, de acordo com Lameiras (2007), esta etapa só ocorre caso a capacidade de carga das fibras seja maior do que a carga no compósito, quando surge a primeira fissura na matriz, isto ocorre, por exemplo, quando o volume de fibras for elevado, acima de 5% em relação ao consumo de cimento. Dessa forma, a primeira fissura no compósito não leva a uma falha brusca, mas, resulta em redistribuição do carregamento entre a matriz e as fibras. Depois de aplicadas cargas adicionais, novas fissuras são abertas, até que a matriz se encontre dividida em um certo número de segmentos separados por fissuras. Esta região da curva tensão-deformação é, aproximadamente, horizontal ou levemente ascendente, parecendo-se com o comportamento plástico.

O processo de fissuração múltipla é importante, uma vez que ele controla a capacidade de absorção de energia do material (tenacidade). Uma evolução do modelo ACK é o modelo proposto por Bentur e Mindess (2007), conforme visto na Figura 15, onde cada nova fissura aberta provoca uma deformação plástica do compósito, seguida de um enrijecimento que resulta em um módulo de elasticidade inferior ao da configuração anterior.

Figura 15 - Processo de fissuração múltipla e curva resultante em um compósito composto por uma matriz frágil reforçado por fibras



Fonte: Allen (1971)

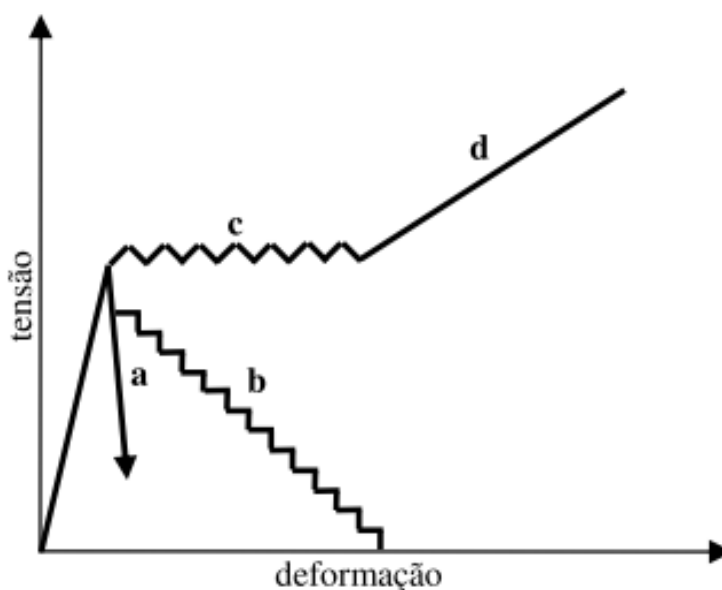
De acordo com Zollo (1997), as características e o desempenho dos materiais cimentícios reforçados com fibras, além de variarem com a formulação da matriz e com o tipo de fibra, também são influenciados pela geometria, distribuição, orientação e volume de fibras no compósito. Devido a isso, é necessário o estudo de dosagem que compatibilize o tipo de fibra com as características necessárias do compósito, principalmente no estado fresco. De acordo com Figueiredo (2011), para que a fibra possa desempenhar sua função, é necessário que ela esteja distribuída de maneira homogênea no compósito, desta forma, recomenda-se lançá-las em taxas controladas em conjunto com os agregados, até a completa homogeneização.

O volume de fibra influencia no comportamento do compósito no estado fresco, sendo importante encontrar o teor ideal para que a quantidade de fibra seja eficiente como reforço e não atrapalhe a fluidez do compósito no estado fresco. Na maioria dos casos, quanto maior a quantidade de fibra, melhor o seu desempenho mecânico. O número necessário de fibras num determinado volume de matriz, para se ter um reforço eficiente, está diretamente relacionado com a probabilidade estatística das fissuras formadas na matriz frágil encontrarem as fibras (ZOLLO, 1997).

De acordo com Proctor (1990), existe uma quantidade mínima de fibra a ser adicionada no compósito para que ela contribua significativamente na resistência. Caso o volume de fibras seja insuficiente, assim que surgir a primeira fissura na matriz, haverá uma ruptura brusca do compósito, provocada pela propagação de uma única fissura.

Na Figura 16, são apresentados de forma esquemática, os processos citados por Proctor (1990), por meio de uma curva tensão-deformação. Esta está dividida em quatro trechos, que correlacionam o comportamento de um compósito a depender do volume de fibras adicionado. No trecho 'a' é mostrada uma situação referente à quantidade insuficiente de fibras, ocasionando assim uma ruptura brusca no compósito. No trecho 'b' é apresentada uma situação em que a quantidade de fibras até é suficiente, mas, o compósito é constituído de fibras curtas. Nos trechos 'c' e 'd', estão os casos em que o volume de fibras atende a todas as necessidades, tanto em relação à quantidade, quanto ao tamanho. Nesses casos, quando a tensão de fissuração da matriz é atingida, todo o carregamento é transferido para as fibras, fazendo com que o compósito apresente um processo de fissuração múltipla e de enrijecimento pós-fissuração múltipla.

Figura 16 - Curva tensão-deformação materiais compósitos a depender do volume de fibras



Fonte: Proctor (1990)

Um fator importante é a orientação das fibras no compósito, para que elas fiquem dispersas de maneira correta. Apesar dos reforços com fibras longas e alinhadas serem mais bem aproveitados, por razões de praticidade de execução do reforço, os compósitos usualmente são reforçados por fibras pequenas e dispersas em toda matriz, (LAMEIRAS, 2007).

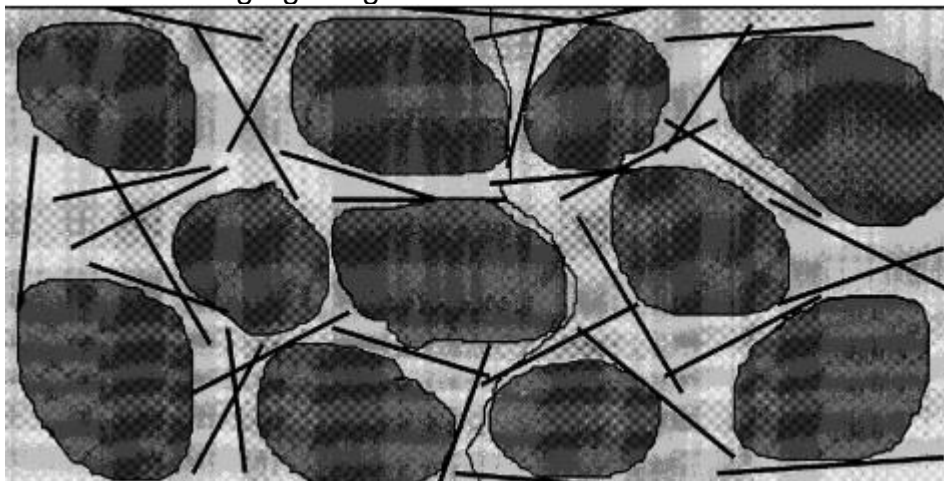
Para que se tenha uma correta orientação das fibras, é necessário acompanhar tanto o método de mistura do compósito, quanto o adensamento no estado fresco. O fator de forma (formato da fibra) também exerce influência na orientação das fibras.

Como exemplos, pode ser citado o caso do alinhamento das fibras metálicas devido ao processo de vibração, há a tendência de se obter um arranjo bidimensional devido ao processo de produção por projeção ou a tendência de se obter um arranjo aleatório das fibras, quando são adotados métodos de produção onde as fibras são misturadas à matriz diretamente na betoneira. (CALLISTER JR, 2002).

Deve-se atentar também à compatibilidade dimensional entre os agregados e as fibras, de modo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorre no compósito. De acordo com Maidl (1991), recomenda-se a utilização de fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto. A compatibilidade dimensional, possibilita a atuação da fibra como reforço do concreto e não como reforço da argamassa do concreto, pois desta maneira, a fissura no compósito se propaga na interface entre o agregado gráudo e a pasta (FIGUEIREDO, 2000).

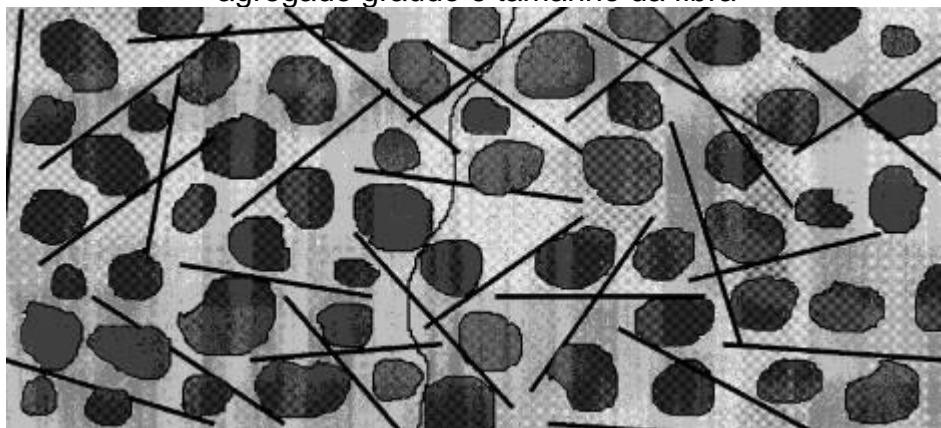
Existem duas maneiras de otimizar a relação entre o diâmetro máximo do agregado gráudo e o comprimento da fibra. Pode-se reduzir o diâmetro do agregado gráudo, ou aumentar o comprimento da fibra, quando nenhuma das duas opções é feita, o reforço da fibra torna-se, sem efeito, conforme ilustrado na Figura 17. Segundo Figueiredo (2000), é necessário que o comprimento da fibra seja o dobro do diâmetro máximo do agregado, e em situações que seja possível aumentar o comprimento da fibra, conforme visto na Figura 18, que assim se faça, caso o aumento do comprimento da fibra possa prejudicar o concreto, é indicado reduzir o diâmetro do agregado gráudo.

Figura 17 - Concreto reforçado com fibra de vidro sem a compatibilidade entre agregado gráudo e tamanho da fibra



Fonte: Figueiredo (2000)

Figura 18 - Concreto reforçado com fibra de vidro com a compatibilidade entre agregado graúdo e tamanho da fibra



Fonte: Figueiredo (2000)

## 2.4 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (GFRC)

A composição de mistura mais simples do GFRC contém cimento, areia, água, superplastificante e fibra de vidro AR. Variações, como o uso de substitutos do cimento, pozolanas ou adições pozolânicas são comuns em vários países e os pigmentos podem ser usados para conferir cor (GRCA, 2018). Podendo ser classificada como uma argamassa reforçada com fibras de vidro ou um microconcreto, que conforme a literatura - Branch (2018), Lima (2019), é um concreto com diâmetro máximo dos agregados de 2,4 mm. Na fabricação do GFRC, podem ser adicionados aditivos que diminuem a relação água/aglomerante, mantendo a fluidez da mistura, conforme especificação de projeto (GUIMARÃES, 2016). O GFRC mesmo não possuindo agregado graúdo, pode ser descrito como um tipo de concreto. De acordo com Kadam (2020), o microconcreto é um concreto com pequeno módulo de finura, mas que possui características, como resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, retração, etc., semelhantes ou superiores aos concretos tradicionais. Conforme Lakshimi (2016), a classificação do microconcreto se dá conforme a granulometria dos agregados, que devem formar uma composição de frações de areias, com diâmetro máximo de 2,4mm. Outros autores tratam matrizes cimentícias reforçadas com fibras de microconcreto, como Branch (2018), Lima (2019), e Etxeberria (2020), devido à suas características mecânicas serem mais similares aos concretos do que as argamassas.

O GFRC é um tipo de compósito cimentício que se distingue dos demais. A maioria dos compósitos cimentícios necessita da fibra como reforço, para corrigir características secundárias (retração, por exemplo). A adição de fibra de vidro em

concretos, juntamente com o ajuste correto de proporções no traço, permite com que a fibra seja o reforço principal, especialmente em peças de menor espessura (LAMEIRAS, 2007).

De acordo com a GRCA (2018), entre as vantagens do revestimento em GFRC, pode-se citar sua durabilidade, resistência química, bom desempenho ao fogo e boas propriedades de isolamento acústico e térmico.

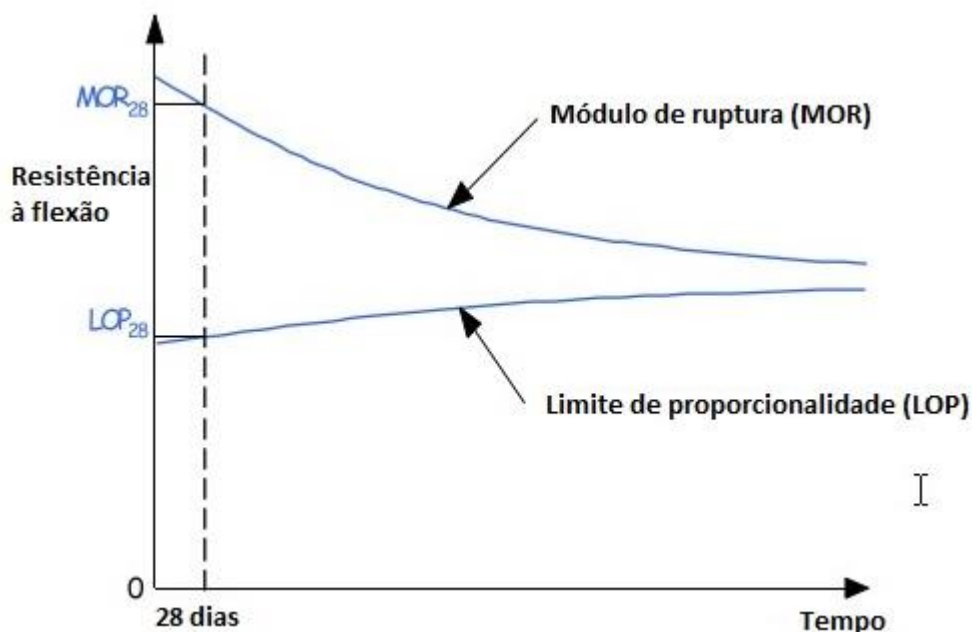
A ABNT NBR 16475:2017 permite a utilização de fibras de vidro em painéis pré-fabricados, respeitando a ABNT NBR 15305:2005. Além disso, o projeto do painel deve especificar a fibra utilizada, a quantidade e as características da fibra introduzida no concreto.

Sobre o projeto, de acordo com a GRCA (2018), o GFRC é usado principalmente para fabricar produtos arquitetônicos e industriais que não precisam cumprir funções estruturais primárias. Esses produtos ainda devem ser cuidadosamente projetados para garantir que não se tornem impróprios para uso durante sua vida útil especificada. Os possíveis efeitos adversos da desmoldagem, manuseio, transporte e fixação, devem ser levados em consideração. As tensões induzidas por retração/movimentos térmicos, cargas permanentes e cargas impostas devem ser calculadas e combinadas para produzir as condições mais desfavoráveis para fins de projeto. O projeto também deve considerar variações prováveis na espessura do GFRC, diferenças no comportamento de flexão e a seção de tamanho real, bem como o modo de colapso e as consequências da falha.

Ainda de acordo com a GRCA (2018), as propriedades do GFRC são estáveis em condições secas, mas a maioria das formulações de GFRC perde uma proporção de sua resistência após longos períodos em condições úmidas. Propriedades como resistência à flexão final e resistência à tração, diminuem para níveis estáveis. As tensões de projeto usadas são geralmente menores do que a resistência à fissuração da matriz (LOP). O LOP (limite de proporcionalidade), tende a aumentar ligeiramente com o tempo devido à hidratação contínua do cimento, conforme é visto na Figura 19.



Figura 19 - Módulo de ruptura e limite de proporcionalidade após 28 dias



Fonte: Adaptado de GRCA (2018)

De acordo com ABNT NBR 15305:2005, a fibra de vidro é um produto fornecido em feixes contendo 100 a 200 filamentos, com diâmetro individual de 10 a 30 micra. Estes feixes podem ser em bobinas (*roving*) ou cortados (picados) em comprimentos de 12 mm a 40 mm. Em compósitos cimentícios, a fibra de vidro utilizada é a do tipo AR, que de acordo também com a ABNT NBR 15305:2005, é resistente aos álcalis do cimento, presentes em cimentos Portland, além de possuírem em média 15% de dióxido de zircônio em sua composição. Existem três abreviações conhecidas para concreto reforçado com fibra de vidro, GFRC (*glass fiber reinforced concrete*) que é a mais conhecida, há também GRC com o mesmo significado, mas, abreviado e, também, CRFV (concreto reforçado com fibra de vidro).

#### 2.4.1 MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE PEÇAS DE GFRC

De acordo com (LAMEIRAS, 2007), existem dois métodos de mistura do GFRC. Um deles se chama *spray*, que é um método de projeção. O método *spray* é dividido em duas etapas, produção da matriz e projeção juntamente com a fibra, diretamente na peça que será utilizada. O outro processo se chama pré-mistura, no qual a matriz e a fibra são produzidas juntas. No processo são misturados os agregados, cimento, água e fibra para posteriormente moldagem na forma. Esse método consiste em duas etapas básicas,

produção da matriz e incorporação das fibras de maneira homogênea. Após o processo de fabricação o compósito é lançado no molde que dará forma a peça.

No método de pré-mistura (ou *premix* como é conhecido) obtém-se um material mais homogêneo, devido ao processo ser mais mecanizado e não depender tanto do fator humano (operador de equipamentos no método *spray*). No método *spray*, é possível empregar maior quantidade de fibras, pois a estas entrarão em contato com a mistura somente no momento do lançamento, não influenciando a trabalhabilidade. Já no método *premix*, é necessário o controle da dosagem da fibra para não afetar na trabalhabilidade (GUIMARÃES, 2016).

A quantidade de fibra de vidro dentro da composição do GRC varia com o método de aplicação, *Spray* e *Premix*. Tanto o método de fabricação quanto a quantidade de fibra dentro da mistura influenciam as propriedades físicas e químicas do GRC. (GUIMARÃES, 2016).

Outro fator importante são os equipamentos de mistura e concretagem, que basicamente são os mesmos equipamentos para um concreto tradicional. Quando comparado ao GFRC no método *spray*, por exemplo, além de ter uma dependência maior do operador, necessita também de uma bomba de projeção. Entre as desvantagens do método *premix* estão os danos causados nas fibras durante o processo de mistura, a baixa eficiência do reforço devido à distribuição tridimensional das fibras (pois influenciam o esforço de flexão), as dificuldades de adensamento do material ainda no estado fresco e as limitações impostas pelo método com relação ao teor e tamanho das fibras (ACI COMMITTEE 544, 2018).

Em relação ao teor de fibra, a *International Glass fiber Reinforced Concrete Association* (2018), GRCA recomendou um teor de fibra máximo de 3,5% com relação à proporção de cimento da mistura (menor do que o teor máximo admitido para outros métodos de produção). Já, o comprimento máximo de fibra recomendado é de 25 mm (CEM-FIL, 2020). Conforme observado por Kharitonov (2015) e Wang (2019), a utilização de teores maiores de fibra, ou fibras com maiores comprimentos diminuem a fluidez do compósito no estado fresco, além de não dispersarem adequadamente.

Em consideração à quantidade de fibras no compósito é importante avaliar a relação tamanho x quantidade. O aumento no teor de fibras do GFRC leva a uma maior tensão de primeira fissuração (BOP), resistência à tração (UTS), deformação de ruptura do material, bem como maior módulo de ruptura (MOR) (HILLES, 2019). Conforme observado Kharitonov (2016) e Wang (2019), o aumento do tamanho das fibras também

proporciona uma melhoria na resistência mecânica dos GFRCs, porém não no mesmo grau da alcançada com o aumento do teor de fibras.

Com relação ao efeito do teor de agregado do GFRC, resultado da incorporação da areia ao compósito, Lameiras (2007) verificou que, quando comparado com o GFRC produzido com pasta de cimento (somente cimento e água), ocorre a redução dos valores do PEL (limite de elasticidade) e MOR (modulo de ruptura), devido a necessidade de elevar a relação água/cimento para a mesma trabalhabilidade. Entretanto, um compósito que contém areia na sua composição consegue ser mais estável que um compósito com apenas a pasta de cimento, devido à estabilidade que proporciona à matriz cimentícia, já que quanto maior o consumo de cimento, maior a propensão à fissuração por retração.

É importante ajustar a fluidez do compósito para que não seja prejudicial no momento da concretagem. O procedimento de concretagem do compósito no método de pré-mistura, a moldagem se dá por gravidade, em fôrmas abertas e vibração externa (das fôrmas) são comumente aplicadas para remover o ar aprisionado e ajudar o escoamento da mistura (MAJUMDAR e LAWS, 1991). Outro método utilizado é a vibração interna (imersão no compósito) onde é inserido um agitador mecânico (vibrador de imersão) no compósito com a mesma finalidade, expulsar o ar incorporado da mistura, e auxiliar o adensamento da peça.

De acordo com Debs (2017), o processo produtivo de painéis de fechamento com o compósito GFRC é similar aos processos produtivos de painéis pré-fabricados com concreto tradicional. Os materiais são previamente selecionados e os seus carregamentos são feitos pelo método de pesagem. Após todos os agregados e fibras estarem pesados, são direcionados ao misturador, que após a homogeneização dos materiais, descarrega o compósito em um recipiente de transporte para encaminhar até a fôrma que será concretada. Após o compósito ser despejado na fôrma, acontece à vibração, com a finalidade de preencher todos os espaços e eliminar bolhas que possam estar aprisionadas no interior da peça.

Na lista a seguir estão descritos os processos de concretagem de uma peça com GFRC:

1. seleção e caracterização dos materiais
2. pesagem
3. mistura do compósito
4. verificação da fluidez
5. liberação para transporte

6. concretagem
7. vibração
8. início da cura
9. desforma
10. acabamento
11. transporte

#### 2.4.2 DESEMPENHO MECÂNICO E FÍSICO DO GFRC

De acordo com a GRCA (2018), o GFRC não é um material único e suas propriedades podem ser variadas para se adequar ao uso final. O processo de projeto deve reconhecer isso e especificar o grau de GFRC com base nas propriedades físicas exigidas. As propriedades físicas do GFRC dependem da composição da pasta cimentícia, do teor de fibra e do método de fabricação e cura. A GRCA (2018) classificou o GFRC em 3 graus de material com base na resistência à flexão de 28 dias. São grau 18, grau 10 e grau 5, onde o grau é correspondente à resistência do compósito à flexão em MPa, aos 28 dias.

O GFRC possui incertezas quanto às características mecânicas do compósito no longo prazo, por esse motivo o GFRC geralmente não exerce função estrutural, apenas fechamento (MAJUMDAR e LAWS, 1991). A GRCA (2018) citou que mesmo com as propriedades mecânicas de um GFRC grau 18, ainda é necessário que o GFRC seja tratado como um compósito destinado às peças não estruturais.

Lameiras (2007), avaliou o desempenho de compósitos de GFRC com envelhecimento acelerado, e observou uma perda de, aproximadamente, 50% na resistência à compressão e à flexão do compósito em situações em que foram aplicados os processos de envelhecimento acelerado, onde os corpos de prova foram imersos em água com temperatura de 50° C, por 56 dias, com a finalidade de simular um tempo de 15 anos.

A condutividade térmica depende da densidade do material e os componentes da mistura. O GFRC comum tem uma densidade típica de 1900 a 2100 kg/m<sup>3</sup> e uma condutividade térmica na gama de 0,5 a 1,0 W/M °C, sendo que quanto maior a densidade do GFRC, mais eficiente isolante térmico este será. (GRCA, 2018).

O isolamento sonoro de um material homogêneo depende de três propriedades físicas:

- massa superficial (peso por unidade de área, kg/m<sup>2</sup>);
- rigidez (forma do painel);

De acordo com Guimarães (2016) a massa superficial é a mais importante na determinação do isolamento acústico.

A “Lei da Massa” correlaciona a massa superficial de um material homogêneo (em kg/m<sup>2</sup> de área), onde os números de redução de som apresentados são baseados em uma média de frequências de 100 Hz a 3150 Hz. Baseado nisso, uma espessura de 80 mm tem uma massa superficial de 80 kg/m<sup>2</sup> (1m largura x 1m de altura x 0,08m de espessura x 2.000 kg/m<sup>3</sup> de massa específica do material), terá uma redução de som médio de cerca de 38 dB. (GUIMARÃES, 2016).

### 2.4.3 DURABILIDADE DOS COMPÓSITOS DE GFRC

Apesar dos avanços da tecnologia dos materiais após o desenvolvimento da fibra de vidro tipo AR, ainda há necessidade de estudos que viabilizem a manutenção da durabilidade ao longo do tempo. A exposição do GFRC ao ambiente natural ainda resultava em mudanças no comportamento mecânico do material, gerando perdas significativas de resistência última e de capacidade de absorção de energia (MAJUMDAR e LAWS, 1991).

De acordo com a Cem-FIL (2020), a resistência à flexão do compósito após envelhecimento estabiliza em 40% da resistência aos 28 dias. Desta maneira, conforme a ACI COMMITTEE 544 (2018), no dimensionamento das peças, deve-se adotar a resistência da peça após envelhecimento, e não os elevados valores encontrados nas primeiras resistências.

De acordo com Bentur e Mindess (2007), a melhoria da durabilidade do GFRC pode ser alcançada com modificações na composição da fibra ou por seus tratamentos superficiais. De acordo com o ACI COMMITTEE 544, 2018), pesquisadores propuseram também melhorar a durabilidade do GFRC alterando a matriz cimentícia, a maior parte dos trabalhos foram realizados tentando reduzir ou eliminar o hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento (ACI COMMITTEE 544, 2018).

Uma das maneiras mais utilizadas para reduzir o hidróxido de cálcio da mistura é a adição de materiais pozolânicos no compósito. Metacaulim, sílica ativa e algumas cinzas são materiais pozolânicos, que demonstraram ter um efeito benéfico nas propriedades do GFRC e matrizes cimentícias. Eles funcionam reagindo com o hidróxido

de cálcio produzido durante o processo de hidratação do cimento para formar silicato de cálcio hidratado, C-S-H. (GRCA, 2018).

O hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento Portland é responsável pelos principais mecanismos de degradação das propriedades do GFRC ao longo do tempo (LAMEIRAS, 2007). Baseado nisso, tem-se buscado alternativas de cimentos que não produzam o hidróxido de cálcio (por exemplo: cimentos de silicatos de cálcio e cimentos de sulfoaluminato de cálcio) que quando hidratados, reajam com o hidróxido de cálcio diminuindo assim a sua proporção no compósito (AMBROISE, 2004).

Quanto maior a quantidade de material pozolânico no material cimentício, maior é a quantidade de hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento que é consumido por este, gerando como produto da reação o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (MEHTA e MONTEIRO 2014). De acordo com NEVILLE (1997), os compósitos cimentícios com maiores teores de cimento apresentam ganhos de resistência mais acelerados que os demais, devido ao maior calor de hidratação, enquanto também necessitam de mais material pozolânico para que seja reagido com o hidróxido de cálcio.

Lameiras (2007) realizou uma pesquisa na qual substituiu o cimento por sílica ativa em compósitos de GFRC. Foi observado que o compósito com 5% de sílica ativa apresentou uma menor perda de resistência à tração (10% inferior à matriz cimentícia com sílica ativa) e menor perda de tenacidade (33% inferior à matriz sem sílica ativa), quando comparado em ensaios de aceleração do envelhecimento. Enquanto o compósito referência retém apenas 20% da tenacidade após 28 dias, o compósito com sílica ativa conseguiu reter 40%.

O metacaulim é outro material pozolânico de alta reatividade utilizado em matrizes cimentícias para evitar reações alcalinas. É um produto amorfo resultante do processo de desidroxilação da caulinita por meio da calcinação em temperaturas controladas (SOUZA SANTOS, 1992). Magalhães *et al.* (1996) realizaram um estudo com adição de 25% de metacaulim em substituição do cimento em compósitos de GFRC. Foram realizados testes com envelhecimento acelerado em água a 50°C e realizado os rompimentos em 28 e 84 dias. Foi observado pelos autores uma maior eficiência do compósito com metacaulim de manter a resistência à tração. Enquanto, um compósito tradicional submetido a rompimento em 28 e 84 dias apresentou redução de 33% para 50% respectivamente da tensão de resistência à tração. O compósito com sílica ativa replicando o mesmo ensaio, apresentou queda de 28% e 57% nas mesmas idades de controle, respectivamente.

Lameiras (2007) observou que existe uma tendência em compósitos GFRC de diminuição da absorção de água e da porosidade aparente do compósito com o aumento do teor de adição de metacaulim. A reação pozolânica aconteceu posteriormente à reação de hidratação do cimento, por esse motivo tendeu a preencher os vazios do material, diminuindo assim a absorção de água.

Soluções foram estudadas por Bartos e Zhu (1996) para a perda de desempenho mecânico de compósitos GFRC, e além de adições como a sílica ativa e o metacaulim, que são usados para diminuir o hidróxido de cálcio na mistura, também há pesquisas com adições de polímeros acrílicos. Outro ponto pesquisado foi a substituição do cimento Portland por outro com menos ou nada de hidróxido de cálcio. Majumdar e Laws (1991) mostraram que o cimento aluminoso apresentou resultado melhor em relação à resistência à flexão e a impactos, mas, que quando expostos a temperaturas acima de 35°C perderam suas melhores características.

O cimento super sulfatado é um material com baixo pH e sem hidróxido de cálcio, composto por escória, sulfato de cálcio e clínquer (BEUTLER, 2020). De acordo com Majumdar e Laws (1991) os testes apresentaram uma redução do limite de proporcionalidade e do módulo de elasticidade na flexão. Outro cimento que não produz hidróxido de cálcio é o cimento CGC (cimento à base de silicatos de cálcio, sulfoaluminato de cálcio, anidrita e escória de alto-forno).

## 2.5 PAINÉIS PRÉ FABRICADOS DE FECHAMENTO

O painel pré-fabricado de fechamento de concreto é um elemento composto de unidades produzidos industrialmente em fôrmas especiais ou padronizadas. Conforme Acker (2002), podem ser compostos de painéis maciços ou sistema sanduiche, com ou sem função estrutural. Possuem a função de fechamento e vedação de fachadas, fixados na estrutura suporte por meio de dispositivos de fixação metálicos (GUIMARÃES, 2016).

Entre os tipos de painéis pré-fabricados, Acker (2002) citou que há duas classificações para painéis, os estruturais e os de fechamento (não estruturais). Os painéis estruturais podem ser utilizados para fechamento interno e externo, além de participarem da estrutura podendo receber carga, enquanto os de fechamento, funcionam apenas como vedação, não recebendo carga e agregando qualidade no acabamento da estrutura.

Comercialmente, o GFRC é usado para fazer painéis leves, que são utilizados como fachadas. Estes painéis não são considerados como elementos estruturais, são projetados para suportar apenas o seu peso próprio e cargas de vento (GUIMARÃES, 2016).

De acordo com a ABNT NBR 16475:2017, os painéis de vedação são elementos não estruturais, que necessitam de uma supra estrutura na qual são fixados e por onde são transmitidas as ações externas e internas sobre os painéis. Os painéis arquitetônicos são aqueles que após a montagem já tenham ao menos em uma das faces o acabamento necessário, sem que haja a necessidade de acabamento.

Os painéis estruturais funcionam como elementos resistentes tanto locais quanto globais. Os painéis de parede alveolar são peças não estruturais, que possuem alvéolos em seu interior com a finalidade de redução do peso por m<sup>2</sup>. O GFRC pode ser utilizado tanto em painéis de vedação, quanto painéis arquitetônicos (GUIMARÃES, 2016).

GFRC é usado principalmente para a fabricação de produtos arquitetônicos e industriais de fachada, que não necessitam cumprir funções estruturais. Estes produtos devem ser projetados para garantir além da durabilidade, efeitos adversos de desmoldagem, manuseio, transporte e fixação que devem ser considerados para que as peças absorvam as possíveis cargas aplicadas (GRCA, 2018).

De acordo com a BSI (2000), painéis pré-fabricados arquitetônicos são aqueles painéis de fechamento que além de suportarem seu peso próprio, resistem à pressão dos ventos e têm na face externa de suas peças outro material que não o concreto comum, o que dá um aspecto de acabamento final a essas peças. Painéis pré-fabricados de fechamento são praticamente similares, mas não necessitam que um dos lados da peça tenha acabamento diferente do concreto, apesar de que é comum que painéis de fechamento tenham um acabamento tão bom quanto painéis arquitetônicos.

De acordo com Debs (2017), as etapas envolvidas na produção de painéis de concretos pré-fabricados dependem da forma de aplicação. No caso do GFRC a produção envolve as seguintes etapas: execução do elemento, transporte da fábrica à obra, montagem e realização das ligações.

Durante o processo de produção na fábrica de peças pré-fabricadas, o processo pode ser dividido em três etapas, de acordo com Debs (2017): atividades preliminares, execução propriamente dita, e atividades posteriores.

Para fins de projeto de elementos de GFRC, o projetista deve fazer a verificação no estado limite último e no estado limite de serviço. Em outras palavras, os elementos



de GFRC não devem ser permitidos a entrar em colapso durante a sua vida útil (GRCA, 2018). A flexão é geralmente a propriedade mais crítica e predominante de carga a considerar no projeto de elementos de GFRC. Na concepção de elementos de GFRC submetidos exclusivamente à flexão e ao cisalhamento, a resistência característica para o estado limite último é tomado como o módulo de ruptura aos 28 dias (MOR28). A resistência característica no estado limite de serviço é tomada como o limite de proporcionalidade aos 28 dias (LOP28) (GRCA, 2018).

### 2.5.1 PRODUÇÃO PRÉ-FABRICADA

A produção de um pré-fabricado é dividida em três etapas: atividades preliminares, execução, e atividades posteriores, conforme Debs (2017).

- atividades preliminares:

Preparação dos materiais: incluem-se nessa fase o armazenamento das matérias-primas, a dosagem e a mistura do concreto, o preparo da armadura (corte e dobramento quando utilizado o método tradicional) e a sua montagem, quando for o caso. Quando a fibra se torna o reforço principal do compósito, não há a etapa de preparo e montagem, uma vez que a fibra é adicionada na etapa de execução.

Transporte dos materiais ao local de trabalho: transporte do concreto recém-misturado e da armadura, montada ou não, até o local da moldagem.

- execução:

Preparação da fôrma e da armadura: limpeza da forma, aplicação de desmoldante, colocação da armadura montada, colocação de peças complementares, como insertos metálicos, fechamento da forma, preparo do concreto, e no caso de materiais cimentícios reforçados com fibras, a adição da fibra no processo de produção do concreto.

- atividades posteriores:

Saque da peça, acabamento, estocagem, transporte, montagem em obra.

No GFRC há processos diferentes, devido a não necessidade da utilização de armaduras. Assim como, toda a estrutura, os painéis pré-fabricados devem ser projetados e construídos de maneira que atendam todos os esforços solicitantes, durante tanto a fase de produção quanto a fase de montagem. Em relação à durabilidade, vida

útil do projeto, mecanismos de envelhecimento, e agressividade ambiental de um painel pré-fabricado, devem-se respeitar as diretrizes da ABNT NBR 9062:2017.

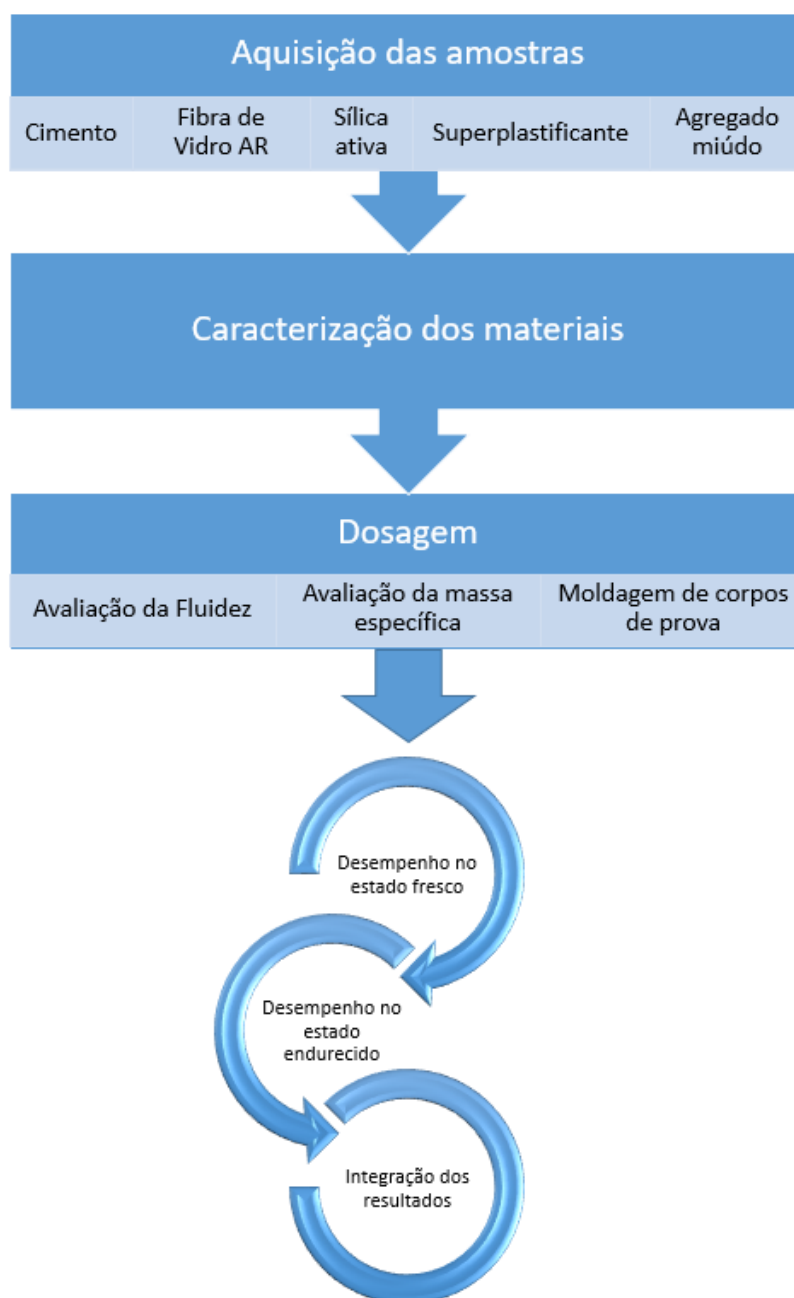
A ABNT NBR 16475:2017 permite a utilização de fibras de vidro em painéis pré-fabricados, respeitando a ABNT NBR 15305:2005. O projeto do painel deve especificar a fibra utilizada, a quantidade e as características da fibra introduzida no concreto.

Com base na fundamentação teórica, o painel pré-fabricado com a fibra de vidro terá características similares aos painéis pré-fabricados tradicionais, podendo possuir mais liberdade de formatos e menores espessuras. Para aferir com estas conclusões, foi definida a metodologia de trabalho que será baseada na comparação de concretos utilizados em painéis pré-fabricados feitos com concreto GFRC e para convencionais, conforme explicado mais detalhadamente no capítulo a seguir.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi produzido como uma pesquisa experimental, para comprovar uma possível influência das propriedades do compósito de GFRC em painéis de fechamentos pré-fabricados. São ilustradas na Figura 20, as etapas da pesquisa, onde iniciou-se com a busca pelos materiais, caracterização, dosagem do compósito, avaliação e integração dos resultados obtidos.

Figura 20 - Método proposto para o desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autor (2022)

A pesquisa experimental comparou uma dosagem de compósito com e sem fibra de vidro. As misturas foram desenvolvidas usando como base as pesquisas de Kharitonov (2016), Hilles (2019) e Jiao (2019), tanto na determinação dos materiais, como na relação água/aglomerante. Tendo em vista a necessidade de limitar possíveis variações, para ambas as misturas, todos os materiais constituintes foram mantidos na proporção, inclusive a mesma relação a/agl (água/aglomerante) – de 0,38, alterando apenas a adição da fibra em uma das misturas na proporção de 1% da massa de cimento, com a finalidade de avaliar sua eficácia.

Os indicadores de desempenho analisados foram às propriedades mecânicas de resistência à compressão, à tração, à flexão, além do módulo de elasticidade, para que possam ser correlacionados com os valores propostos pela GRCA (2018) e pela *Owens Corning* (2020), que orientam como características necessárias de um GFRC. Além destas características, foi analisada a correlação entre os abatimentos dos concretos, para avaliar se a adição da fibra influenciou na fluidez.

### 3.1 MATÉRIAS PRIMAS

Nesta seção serão apresentadas as matérias primas utilizadas para a realização da pesquisa experimental. Buscou-se a seleção de materiais já utilizados na indústria que atendessem as necessidades do projeto.

#### 3.1.1 CIMENTO PORTLAND

O aglomerante foi o cimento Portland tipo CP II F40 da Supremo Cimentos, da fábrica de Adrianópolis/PR. A escolha do material deu-se ao fato de ser um produto que atende aos requisitos técnicos citados a seguir, além de ser amplamente utilizado nas indústrias de pré-fabricados.

Uma das principais características para o cimento no segmento de pré-fabricados é a resistência inicial, pois com menos de 24 h é realizado o saque da peça, para que a fôrma esteja pronta para uma nova produção. Conforme visto na Tabela 4, com 1 dia, o cimento selecionado apresentou 45% da sua resistência final. Por se tratar de um cimento composto do tipo II, ele não apresenta um tempo de início de pega tão baixo quanto cimentos de alta resistência inicial (CPV ARI – alta resistência inicial), mas apresenta resistência similar após 24 horas. Conforme a fabricante, o cimento

selecionado possui tempo de início de pega de aproximadamente 260 minutos, enquanto cimentos de alta resistência inicial do tipo CPV possuem tempo de início de pega na faixa de 200 minutos.

Tabela 4 - Resistência à compressão do cimento CP II F40

<b>Idade (dias)</b>	<b>Resistência a compressão (MPa)</b>	<b>ABNT NBR 16697:2018</b>
1	21,7	--
3	35,5	≥ 15
7	40,6	≥ 25
28	47,5	≥ 40

Fonte: Supremo Cimentos (2021).

Na Tabela 5 é visto as propriedades físicas do cimento, comparando à norma ABNT NBR 16.697:2018.

Tabela 5 - Propriedades do cimento CP II F40

<b>Propriedades</b>	<b>ABNT NBR 16697:2018</b>	
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3,11	
<b>Resíduo de peneiração (%)</b>	75 µm	0,18 ≤ 10,0
	45 µm	1,59
	32 µm	6,71
<b>Sup. Específica de Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>	4989	≥ 2800
<b>Tempo de pega (min)</b>	Início	255 ≥ 60
	Fim	313 ≤ 600
<b>Expansibilidade (mm)</b>	0	≤ 5,0

Fonte: Supremo Cimentos (2021).

### 3.1.2 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado no compósito de GFRC possui origem arenítica, e foi escolhido devido à sua distribuição granulométrica possibilitar a utilização desta como único agregado miúdo. O ensaio granulométrico da areia foi feito de acordo com a ABNT NBR 7211:2009, coletando duas amostras do lote a ser testado. O resultado encontra-se na Tabela Tabela 6.

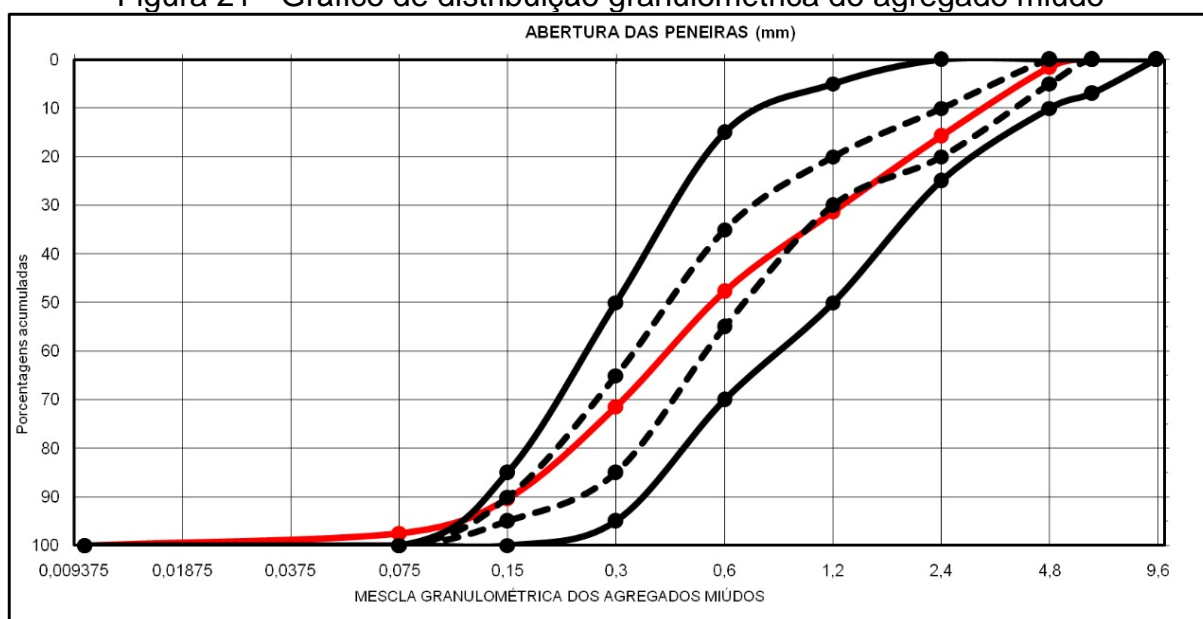
Tabela 6 – Análise granulométrica do arenito

Peneira (mm)	ARENITO COSTA - 1			ARENITO COSTA - 2		
	(gr)	% Ret	%Acum.	(gr)	% Ret	%Acum.
6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4,8	8,3	1,7	1,7	7,7	1,6	1,6
2,4	73,1	14,7	16,4	68,9	14,2	15,8
1,2	72,1	14,5	30,9	75,9	15,6	31,4
0,6	83,0	16,7	47,6	79,4	16,3	47,7
0,3	120,7	24,3	71,9	115,2	23,7	71,4
0,15	94,2	19,0	90,8	92,0	18,9	90,3
0,075	32,3	6,5	97,3	34,5	7,1	97,4
Fundo	13,2	2,7	100,0	12,4	2,6	100,0
<b>Total</b>		496,9			486	
	Módulo - finura	<b>2,59</b>		Módulo - finura	<b>2,58</b>	
	D. Máxima	<b>4,8</b>		D. Máxima	<b>4,8</b>	

Fonte: Autor (2022)

Na Figura 21 é visto a curva gerada pela mescla granulométrica do agregado, onde podemos determinar se a distribuição do agregado miúdo é ideal. Conforme a ABNT NBR 7211:2009 as linhas tracejadas são ditas como zona ótima, enquanto as linhas contínuas externas são ditas como zonas utilizáveis. Desta forma, uma mescla granulométrica que se encontra nos limites da zona ótima, apresentará uma melhor distribuição granulométrica que uma mescla na zona utilizável.

Figura 21 - Gráfico de distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2022)

A determinação da massa específica do agregado miúdo, foi feita de acordo com a ABNT NBR 16972:2021 – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa aparente. O agregado miúdo apresentou massa específica média de 2,64 g/cm<sup>3</sup>, conforme mostrado na Tabela 7. A massa específica do agregado miúdo é necessária para a determinação do volume do compósito e as conversões na elaboração do cálculo de dosagem.

**Tabela 7 - Massa específica da areia**

<b>Areia</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Amostra 1</b>	2,63
<b>Amostra 2</b>	2,64
<b>Amostra 3</b>	2,64

Fonte: Autor (2022).

### 3.1.3 ADIÇÃO POZOLÂNICA

A adição pozolânica utilizada na pesquisa foi a sílica ativa, da empresa Tecnosil. Foi escolhida por ser considerada uma adição de alta reatividade, além da proteção que ela proporciona à fibra de vidro visando minimizar o ataque dos álcalis presentes no cimento, conforme estudou Peruzzi (2002). A sílica ativa também reduz a alcalinidade da matriz cimentícia, conforme estudou Guimarães (2016), pela reação com o hidróxido de cálcio.

A sílica ativa possui outras características, como por exemplo, controlar o hidróxido de cálcio, oriundo da hidratação do cimento (um dos principais componentes de perda de durabilidade). Bentur e Diamond (1986) observaram que ao substituir 10% do consumo do cimento por sílica ativa, os GFRCs apresentaram uma menor perda de resistência à tração (de 75%) em processo de envelhecimento acelerado, com 28 dias em uma temperatura de 50°C. Bartos e Zhu (1996) realizaram estudos substituindo também 10% do cimento por sílica ativa, e verificaram que a perda de resistência à tração em processo de envelhecimento acelerado (40 dias em água a 60°C) foi 55% menor no GFRC com sílica ativa do que no GFRC sem sílica ativa.

Conforme apresentou Prizskulnik (2005), a sílica ativa tem atividade pozolânica, que corresponde a capacidade de um material em pó reagir com o hidróxido de cálcio – Ca(OH)<sub>2</sub> em presença de umidade, além de ser fina (superfície específica de 20.000 m<sup>2</sup>/kg), conforme é visto na Tabela 8.

Tabela 8 - Características físicas e químicas da sílica ativa

<b>Teor de SiO<sub>2</sub></b>	<b>&gt;85%</b>
<b>Superfície específica</b>	20.000 m <sup>2</sup> /kg
<b>Formato da partícula</b>	Esférico
<b>Massa específica</b>	2220 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Ficha Técnica - Tecnosil (2020).

### 3.1.4 SUPERPLASTIFICANTE

O aditivo superplastificante utilizado foi o Liga Flow 703, da indústria Liga Química de Araranguá/SC. O Liga Flow 703 é um aditivo de última geração à base de éter policarboxilato, possui compatibilidade com o CP II F40 e proporciona redução de consumo de água de, aproximadamente, 40% (LIGA QUÍMICA, 2021). As principais propriedades estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades do superplastificante

<b>Base Química</b>	<b>Policarboxilato</b>
<b>Estado físico:</b>	Líquido
<b>Cor:</b>	Castanho Claro
<b>pH:</b>	6,0 – 7,0
<b>Densidade</b>	1,04 – 1,08

Fonte: Ficha técnica - Liga Química (2021).

### 3.1.5 ÁGUA

A água utilizada para a confecção dos testes foi de origem da rede pública de abastecimento de Curitiba, realizado pela empresa SANEPAR que pública diariamente a análise da água distribuída, na Tabela 10 estão os valores médios disponibilizados pela concessionária dos 30 dias que incluem a data da realização dos ensaios. Nota-se que os parâmetros estão de acordo com a ABNT NBR 15900:2009 – água para amassamento do concreto.



Tabela 10 – Características químicas da água

<b>Característica</b>	<b>Valor médio de 30 dias de leitura</b>
Cor	2,83 Uh-Un.
Fluoretos	0,8 mg/L
Turbidez	0,71 NTU
pH	6,81
Cloro residual	1,06 mg/L
Alumínio	0,028 mg/L
Ferro	0,035 mg/L
Maganês	0,018 mg/L

Fonte: SANEPAR (2021).

### 3.1.6 FIBRA DE VIDRO

A fibra de vidro utilizada nesta pesquisa foi do tipo AR – *Fiber glass Cem-FIL 12* mm, da fornecedora *Owens Corning*. A escolha específica do material se deu devido à sua performance em matrizes cimentícias, na qual possibilita aumento de cerca de 50% na resistência à tração do compósito, conforme estudado por Kharitonov (2016), além de possuir elevada resistência à tração, quando comparado à produtos cimentícios. Na Tabela 11 são observadas as características específicas da fibra de vidro da *Owens Corning*.

Tabela 11 - Propriedades da fibra de vidro

<b>Resistência à tração do Filamento</b>	3.500 (MPa)
<b>Resistência à tração do Fio</b>	1.700 (MPa)
<b>Deformação da ruptura do Fio</b>	2.4 (%)
<b>Módulo de Elasticidade</b>	72 (GPa)
<b>Massa específica</b>	2,68 (g/cm <sup>3</sup> )

Fonte: Ficha técnica - Owens Corning (2020).

Na Tabela 12, é possível observar a composição química da fibra utilizada, conforme relatório disponibilizado pela fabricante.

Tabela 12 - Composição química fibra de vidro

Componentes	Proporção (%)
SiO <sub>2</sub>	55 – 75
ZrO <sub>2</sub>	15 – 20
Óxidos Alcalinos	11 – 21
Óxidos Alcalinos Terrosos	0 – 6
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 – 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 – 5

Fonte: Ficha técnica - Owens Corning (2020).

## 3.2 MÉTODO

Nesta seção, serão vistos os métodos adotados, os ensaios realizados na pesquisa e as etapas para a confecção do compósito.

### 3.2.1 DOSAGEM

O dimensionamento do compósito foi realizado para que fosse possível atender os requisitos necessários, do ponto de vista técnico (resistências à tração, flexão, compressão, fluidez), econômico (custo), e estético (acabamento).

O dimensionamento seguiu o modelo de Kharitonov (2016). Os materiais utilizados foram: Cimento Portland (CP II F 40, Supremo Cimentos), arenito (módulo de finura de 2,59), fibra de vidro AR (Owens Corning), e superplastificante à base de éter policarboxilato (Liga Química), este último foi necessário para aumentar a fluidez e diminuir a necessidade de água na mistura sem intervir no fator a/agl determinado.

Foram elaboradas duas misturas similares, mantendo as mesmas proporções, apenas variando os resultados. A relação a/agl (água/aglomerante) foi fixada em 0,38. A dosagem do superplastificante para atender a fluidez necessária foi de 0,9% em relação à quantidade de aglomerante da mistura.

O traço utilizado na pesquisa experimental está descrito na Tabela 13, nas proporções em m<sup>3</sup> e no formato de traço unitário, tanto para a mistura com fibra, quanto para a mistura sem a fibra de vidro.

Tabela 13 - Traço compósito GFRC

<b>Material</b>	<b>Traço por m<sup>3</sup> sem fibra</b>	<b>Traço por m<sup>3</sup> com fibra</b>	<b>Traço unitário sem fibra</b>	<b>Traço unitário com fibra</b>
Cimento	627	625	1,00	1,00
Sílica ativa	69	69	0,11	0,11
Arenito	1239	1235	1,98	1,98
Fibra de vidro AR	6,00	6,25	0,01	0,01
Superplastificante		6,25	0,01	0,00
Água	263	262	0,42	0,42

Fonte: Autor (2022).

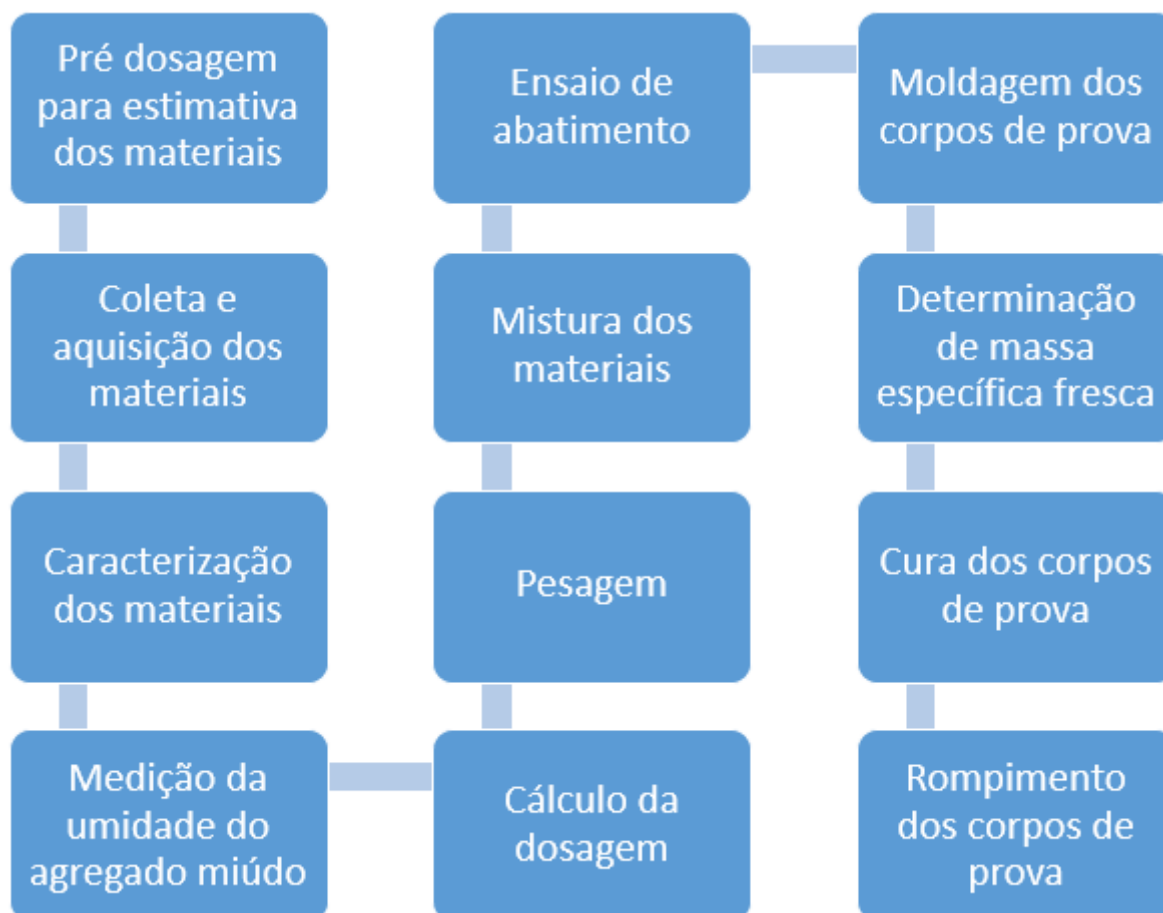
A fibra de vidro foi utilizada na proporção de 1% em relação à quantidade de cimento em massa. Essa relação foi baseada no estudo de Kharitonov (2016) e Hilles (2019). Kharitonov (2016) utilizou três proporções, uma destas sem a adição de fibra de vidro, uma com 1,5% de fibra de vidro e a outra com 2,5% de fibra de vidro. Hilles realizou comparação com quatro dosagens diferentes de fibra de vidro (0,3%, 0,6%, 0,9% e 1,2%), além do compósito sem adição. Comparando os resultados de Kharitonov (2016) e Hilles (2019), entende-se que a dosagem de 1,0% de fibra de vidro proporciona o desempenho esperado de resistência à flexão, de 10 MPa – grau 10, baseado na literatura da GRCA (2018).

A sílica ativa foi utilizada substituindo 10% da quantidade de cimento em massa, baseado nos resultados de Lameiras (2007), que mostrou a eficácia da adição de sílica ativa em compósitos de GFRC, conseguindo resultados superiores a 100% sobre a resistência à tração de compósitos sem a adição de fibra.

### 3.3 MISTURA DO COMPÓSITO

O processo de mistura do compósito é a realização da pesquisa experimental, as etapas deste processo estão descritas na Figura 22.

Figura 22 - Etapas do processo de mistura do compósito



A pré-dosagem serve para realizar estimativa da quantidade de materiais necessários, após isso, os materiais são coletados e é realizada a caracterização para confirmação das suas respectivas características físicas. Em laboratório é realizada a medição da umidade do agregado miúdo e posteriormente feito o cálculo da dosagem do material, baseando-se no volume do compósito que será produzido. Após estes processos preliminares, são realizadas as pesagens dos materiais, e realizada a mistura do compósito. Após a mistura estar homogênea, é realizado o ensaio de abatimento para aferição da fluidez do compósito, e esta estando dentro do objetivo, é feita a moldagem dos corpos de prova para controle da resistência mecânica, e o ensaio de determinação da massa específica fresca do compósito. Após a moldagem, os corpos de provas são

encaminhados para o local onde aguardarão a data de rompimento, onde poderá ser aferida sua resistência.

Foram realizadas duas misturas experimentais, de acordo com a ABNT NBR12821:2009, sendo a primeira de referência (sem fibra), e a segunda com fibra (GFRC). Na primeira mistura, após todos os materiais estarem pesados, iniciou-se a confecção do concreto. A ordem de carregamento na betoneira foi à seguinte:

1. Agregado miúdo;
2. 70% da água;
3. Cimento;
4. 30% da água
5. Superplastificante;

Foram necessários, aproximadamente, 10 minutos de mistura para que o concreto atingisse a consistência desejada, baseada nos estudos de Kizilkanat (2015) e Wang (2019).

Após aferição da consistência pelo abatimento de tronco de cone (Figura 23), de acordo com a ABNT NBR 16889:2020, foram moldados os corpos de prova cilíndricos (compressão, tração e módulo) e prismático (flexão) para avaliação das resistências, de acordo com a ABNT NBR 5738:2015.

Figura 23 – Teste de abatimento com tronco de cone com concreto sem fibra



Fonte: Autor (2022)

Os corpos de prova cilíndricos, ilustrados na Figura 24, foram moldados da seguinte forma: quatro corpos de prova para resistência à compressão – sendo dois para rompimento com 7 dias e dois para 28 dias, dois para resistência à tração – sendo os dois com rompimento para 28 dias, e dois para módulo secante – sendo os dois para rompimento em 28 dias.

Figura 24 - Moldagem de corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autor (2022)

Para os corpos de prova prismáticos, foram moldados dois corpos de prova para a resistência à flexão, sendo os dois para rompimento com 28 dias, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Moldagem de corpos de prova prismáticos



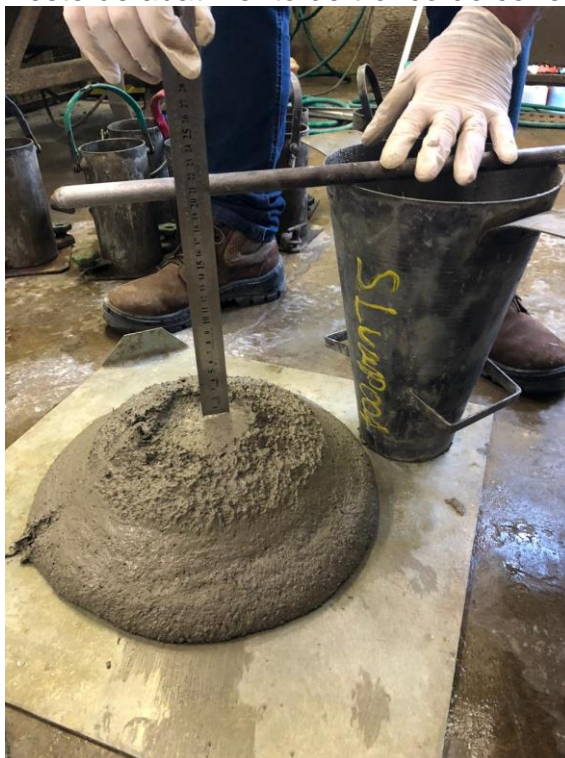
Autor (2022)

Na segunda mistura (GFRC), após todos os materiais estarem pesados, iniciou-se a confecção do compósito. A ordem da betoneira foi:

1. agregado miúdo;
2. 70% da água;
3. cimento;
4. 30% da água.
5. superplastificante;
6. fibra de vidro;

Novamente, foram necessários aproximadamente 10 minutos de mistura para a completa dispersão da fibra no compósito, sendo atingida a consistência desejada, baseada na literatura de Kizikanat (2015) e Wang (2019). Após a completa homogeneização foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme visto na Figura 26.

Figura 26 - Teste de abatimento de tronco de cone com GFRC



Fonte: Autor (2022)

Após a aferição da consistência pelo abatimento de tronco de cone (Figura 26), de acordo com a ABNT NBR 16889:2020, foram moldados os corpos de prova cilíndricos (compressão, tração e módulo) e prismático (flexão) para a avaliação das resistências, de acordo com a ABNT NBR 5738:2015.

Os corpos de prova cilíndricos, ilustrados na Figura 24, foram moldados da seguinte forma: quatro corpos de prova para resistência à compressão, sendo dois para rompimento com 7 dias e dois para 28 dias, dois para resistência à tração, sendo os dois com rompimento para 28 dias, e três para modulo secante, sendo os três para rompimento em 28 dias.

Após a moldagem tanto dos corpos de prova cilíndricos, quanto os prismáticos, foram etiquetados, cobertos com plástico filme e mantidos em local coberto com temperatura ambiente para o processo de cura inicial, conforme ilustrado na Figura 27 e na Figura 28, seguindo as recomendações da ABNT NBR 5738:2015.



Figura 27 - Processo de cura inicial dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autor (2022)

Figura 28 - Processo de cura inicial dos corpos de prova prismáticos



Fonte: Autor (2022)

Paralelamente à moldagem dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de determinação de massa específica, pelo método gravimétrico, de acordo com a ABNT NBR 9833:2008, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Determinação de massa específica fresca



Fonte: Autor (2022)

Após o processo de moldagem dos corpos de prova e dos seus armazenamentos, seguindo as normas de cura ABNT NBR 5738:2015, os corpos de prova foram direcionados para o rompimento. Os corpos de prova com o objetivo de resistência à compressão, foram rompidos de acordo com a ABNT NBR 5739:2018. Os corpos de prova para resistência à tração, serão rompidos de acordo com a ABNT NBR 7222:2011. Os corpos de prova para resistência à flexão serão rompidos de acordo com a ABNT NBR 12142:2010, e os corpos de prova destinados à determinação do módulo de elasticidade seguiram os procedimentos da ABNT NBR 8522:2021.

### 3.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Nesta seção serão abordados os ensaios realizados para avaliação de desempenho do compósito. Os ensaios podem ser divididos em duas classes: para estado fresco e endurecido. O estado fresco de um material cimentício se dá antes do processo de hidratação do cimento, enquanto o compósito apresentar trabalhabilidade. Neste estado, inicialmente é realizada a preparação do compósito cimentício, conforme a ABNT NBR 12821:2003, após a mistura do compósito, são realizados ensaios de abatimento, conforme a ABNT NBR 16889:2020, e de determinação da massa

específica, conforme a ABNT NBR 9833:2008. O teste de abatimento demonstra a fluidez do compósito, e neste caso, será necessário para avaliar se a adição da fibra de vidro influenciará neste. Com a determinação da massa específica fresca, constata-se a densidade do compósito, sendo possível observar se há alguma incorporação de ar – que afetaria o desempenho do compósito no estado endurecido.

Após a hidratação do cimento, os ensaios realizados são os de estado endurecido, na qual avalia-se as propriedades mecânicas de resistência do compósito. No estado endurecido, serão avaliados os desempenhos mecânicos de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, conforme as prescrições da ABNT NBR 5739:2018, ABNT NBR 7222:2011 e ABNT NBR 8522:2021, respectivamente. Foram utilizados para estes ensaios corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 100 milímetros e 200 milímetros de altura. Para a resistência à compressão, foram moldados 8 corpos de prova, 4 para rompimento com 7 dias, e 4 para rompimento aos 28 dias. Para a resistência à tração e determinação do módulo de elasticidade foram moldados 4 corpos de prova para rompimento aos 28 dias cada. Para a determinação da resistência à flexão foram moldados 4 corpos de prova prismáticos, com dimensões de 150x150x500 mm, conforme a ABNT NBR 12.142:2010. Os resultados mecânicos obtidos, serão correlacionados com a literatura recente, criando uma relação a fim de entender a relação dosagem fibra por resistência obtida.

## 4 RESULTADOS

Nesse item serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho.

### 4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Nesta seção, serão vistos os resultados obtidos por meio dos ensaios do compósito no estado fresco.

Os resultados de consistência das matrizes cimentícias, estão apresentados na Tabela 14, comparando com a literatura.

Tabela 14 - Determinação do abatimento da pesquisa experimental comparada à literatura.

<b>% de fibra</b>	<b>0%</b>	<b>1% - GFRC</b>
<b>Autor (2022)</b>	240 mm	210 mm
<b>Wang (2019)</b>	181 mm	132 mm
<b>Kizilkanat (2015)</b>	180 mm	80 mm

Fonte: Autor (2022).

O objetivo do ensaio foi observar a influência da adição da fibra no abatimento do compósito. Tal influência está de acordo com Kizilkanat (2015) e Wang (2019), que estudaram a variação de dosagens de fibra de vidro em uma mesma matriz cimentícia e observaram que quanto maior a adição a fibra de vidro, menor o abatimento da mistura, entretanto, pode-se notar que o abatimento da pesquisa experimental foi superior às referências. Além da dosagem da fibra de vidro, os fatores que influenciam diretamente no abatimento são: consumo de água por m<sup>3</sup> e teor de superplastificante. Nota-se que Wang (2019) e Kizilkanat (2015) estudaram proporções com menor consumo de água por m<sup>3</sup>. Wang (2019) não utilizou superplastificante em seu estudo, e teve uma demanda no consumo de água 21% superior à Kizilkanat (2015), conforme é visto na Tabela 15.

Tabela 15 – Consumo de água e dosagem de superplastificante da pesquisa experimental e literatura.

	<b>Água (litros/m<sup>3</sup>)</b>	<b>% superplastificante</b>
<b>Autor (2022)</b>	262	0,9%
<b>Wang (2019)</b>	218	0%
<b>Kizilkanat (2015)</b>	180	0,8%

Fonte: Autor (2022)

#### 4.1.1 DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO FRESCO

Os resultados de massa específica no estado fresco das matrizes cimentícias, estão apresentados na Tabela 16, comparando com a literatura.

Tabela 16 - Determinação de massa específica fresca da pesquisa experimental e da literatura

<b>% de fibra de vidro</b>	<b>0%</b>	<b>0,9%</b>	<b>1,0%</b>
<b>Autor (2022)</b>	2.224 (kg/m <sup>3</sup> )		2.204 (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Hilles (2019)</b>	2.417 (kg/m <sup>3</sup> )	2.436 (kg/m <sup>3</sup> )	
<b>Kizilkanat (2015)</b>	2.444 (kg/m <sup>3</sup> )		2.409 (kg/m <sup>3</sup> )

Fonte: Autor (2022)

O objetivo do ensaio foi observar a influência da adição da fibra na massa específica fresca do compósito. Tal influência está de acordo com os resultados por Hilles (2019) e Kizilkanat (2015), que estudaram matrizes cimentícias com reforço de fibra de vidro, e observaram que a adição da fibra de vidro não teve efeito significativo na massa específica fresca do compósito. Nota-se que a massa específica do compósito da pesquisa experimental foi inferior às referências da literatura. De acordo com Silva (2003), a massa específica de um compósito cimentício é relativa aos materiais constituintes, podendo variar de 1500 kg/m<sup>3</sup> a 2800 kg/m<sup>3</sup>.

Conforme GRCA (2018) a densidade regular de um GFRC está normalmente em torno de 2000 kg/m<sup>3</sup> como é visto na Tabela 17, valor que é está abaixo da densidade do concreto convencional.

Tabela 17 - Massa específica de um GFRC conforme a GRCA.

<b>Tipo do GFRC</b>	<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Spray-Up</b>	1.900 – 2.100
<b>Premix</b>	1.900 – 2.000

Fonte: GRCA (2018)

Nota-se que a massa específica indicada pela GRCA (2018) é menor quando comparada à do compósito testado, o que pode ser atribuído às características dos: agregados (com maiores massas específicas) ou melhor distribuição granulométrica da mistura.

#### 4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Nesta seção, serão vistos os resultados obtidos nos ensaios do compósito no estado endurecido.

##### 4.2.1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FIBRA DE VIDRO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS TESTADOS

Os resultados de resistência à compressão das matrizes cimentícias, com 7 e 28 dias de cura, estão apresentados na Tabela 18. A amostra sem a adição de fibra, foi identificada como GF-0, enquanto a amostra com a adição de fibra foi classificada como GF-1.

Tabela 18 – Tabela de resistência à compressão axial das amostras da pesquisa experimental aos 7 e 28 dias

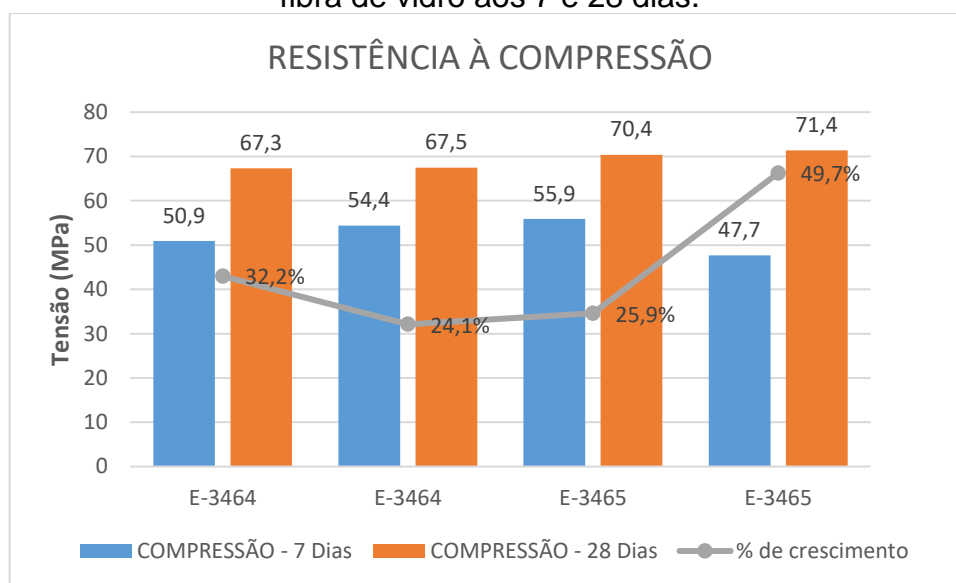
<b>ID da amostra</b>	<b>Força máxima (N) – 7 dias</b>	<b>Resistência à compressão – 7 dias</b>	<b>Força máxima (N) – 28 dias</b>	<b>Resistência à compressão - 28 dias</b>	<b>Resistência do exemplar</b>
<b>GF-0</b>	399.146	50,911	533.311	67,331	67,5
<b>GF-0</b>	426.563	54,425	537.197	67,514	
<b>GF-1</b>	442.786	55,931	553.491	70,475	71,4
<b>GF-1</b>	380.891	47,724	568.109	71,442	

Fonte: AUTOR (2022)

É possível notar que a adição de fibra de vidro alterou o comportamento mecânico do compósito. No rompimento do corpo de prova após 7 dias, a matriz que

teve a adição da fibra de vidro, apresentou desempenho superior de 2,75% em relação à matriz sem a mesma. Já, no rompimento após os 28 dias, a matriz que teve a adição de fibra de vidro, teve um desempenho de 5,78% superior à matriz sem a adição de fibra de vidro. Conforme pode ser visto na Figura 30, a matriz com a adição de fibra de vidro, teve um aumento de 7 para 28 dias de 49,7%, enquanto a matriz sem a adição de fibra de vidro apresentou um aumento de apenas 32,2% na sua resistência à compressão no rompimento à compressão dos 7 para 28 dias.

Figura 30 – Resistência à compressão das matrizes cimentícias com e sem a adição de fibra de vidro aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autor (2022)

Hilles (2019) e Ali (2019) obtiveram resultados similares com aqueles verificados na Tabela 19. Hilles (2019) observou que a matriz cimentícia que teve adição de 1,2% de fibra de vidro, apresentou resistência à compressão 15% maior que a matriz sem a adição de fibra de vidro, e teve maior taxa de crescimento de 7 para 28 dias comparado à matriz sem fibra. No estudo de Ali (2019) a matriz cimentícia que teve adição de 0,75% de fibra de vidro apresentou uma resistência à compressão 6,47% superior à matriz sem adição de fibra de vidro após 28 dias.

Entretanto, Kumar *et al.* (2020) e Kharitonov (2016) obtiveram resultados opostos à pesquisa experimental. Kumar *et al.* (2020) compararam a mesma matriz cimentícia, após a adição da fibra de vidro, na dosagem de 1,0% em relação ao peso do cimento e obteve uma resistência à compressão aos 28 dias de 4,7% inferior comparada à matriz cimentícia sem a adição da fibra, mas apresentou comportamento similar da matriz com

adição de fibra, quanto ao crescimento de resistência de 7 para 28 dias comparada à matriz sem adição e fibra, a matriz com a fibra de vidro apresentou crescimento de resistência de 26% superior. Kharitonov (2016) comparou a mesma matriz cimentícia com duas dosagens de fibra, com 1,5% e 2,5%. A matriz cimentícia que teve a adição de 1,5% de fibra de vidro apresentou decréscimo de resistência à compressão com 28 dias de 3,04%, enquanto a matriz cimentícia que recebeu a adição de 2,5% de fibra teve um decréscimo de resistência à compressão de 21,7%.

Na Tabela 19 é visto o comparativo geral com as referências da literatura, por consumo de cimento e dosagem da fibra e sendo comparado a resistência à compressão alcançada com e sem a adição da fibra de vários autores. Nota-se que as adições de fibra de vidro variam de 0,75 a 2,5% sobre o peso do cimento, dentro da faixa de dosagem sugerida pela GRCA (2018), qual sugere que a dosagem máxima para um compósito de GFRC seja de 3,5% em relação à quantidade de cimento. Percebe-se também, que quanto maior o consumo de fibra de vidro, pior é o desempenho mecânico na resistência à compressão.

Tabela 19 - Comparativo de desempenho contra as referências – resistência à compressão

<b>Autores</b>	<b>Teor de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Teor de fibra (%)*</b>	<b>Resistência aos 28 dias à compressão sem fibra (MPa)</b>	<b>Resistência aos 28 dias à compressão com fibra (MPa)</b>
<b>Autor (2022)</b>	600	1,0%	67,5	71,4
<b>Kharitonov (2016)</b>	745	1,5%	49,3	47,8
<b>Kharitonov (2016)</b>	745	2,5%	49,3	38,6
<b>Hilles (2019)</b>	600	1,2%	57,85	66,60
<b>Ali (2019)</b>	390	0,75%	38,94	41,46
<b>Kumar (2020)</b>	-	1,0%	30,12	28,70

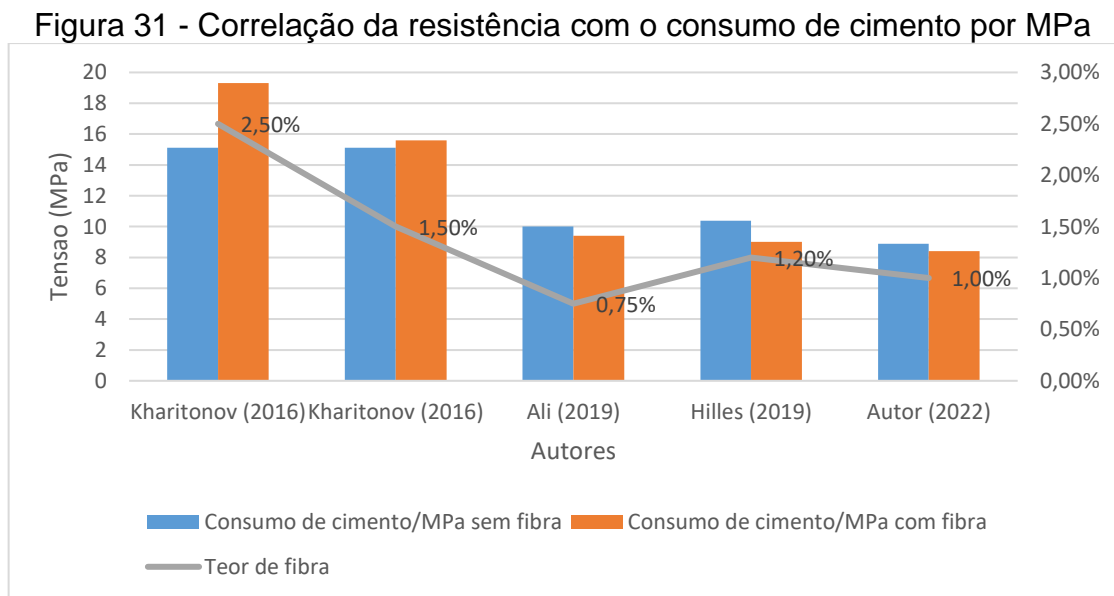
Fonte: Kharitonov (2016), Hilles (2019), Ali (2019), Kumar (2020) e Autor (2022)

\*Teor de fibra em relação ao peso do cimento

Nota-se também, uma relação direta entre o consumo de cimento por mistura e a resistência à compressão em MPa para cada uma destas. Assim, é possível criar um



padrão para análise. Quanto menor a relação de “consumo de cimento/MPa” mais otimizado está o traço do compósito, pois necessita de uma menor quantidade de cimento para atingir a uma resistência determinada. Desta forma, é possível avaliar também a influência da adição da fibra de vidro no compósito cimentício, onde as matrizes cimentícia que tiveram maiores adições de fibra, necessitaram de mais cimento para atingir uma mesma resistência. Conforme é visto na Figura 31, os compósitos que tiveram adição de 1,0 e 1,2% de fibra de vidro em relação ao peso do cimento, necessitaram de menos cimento (aproximadamente 9 kg de cimento / MPa), enquanto o compósito com adição de 2,5% sobre o peso do cimento necessitou de aproximadamente 19 kg de cimento / MPa.



Fonte: Autor (2022)

A Cem-FIL (2020) indicou uma faixa de resistência mínima para que um compósito com fibra de vidro pudesse ser caracterizado como GFRC, conforme visto na Tabela 20. Desta forma, é possível observar que o compósito da pesquisa experimental obteve desempenho superior ao indicado pela Cem-FIL (2020).

Tabela 20 – Resistência à compressão mínima para GFRC conforme a GRCA

Tipo do GFRC	Resistência à compressão (MPa)
Spray-Up	50 – 80
Premix	40 – 60

Fonte: CEM-FIL (2020)

#### 4.2.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FIBRA DE VIDRO NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à tração das matrizes cimentícias, estão apresentados na Tabela 21.

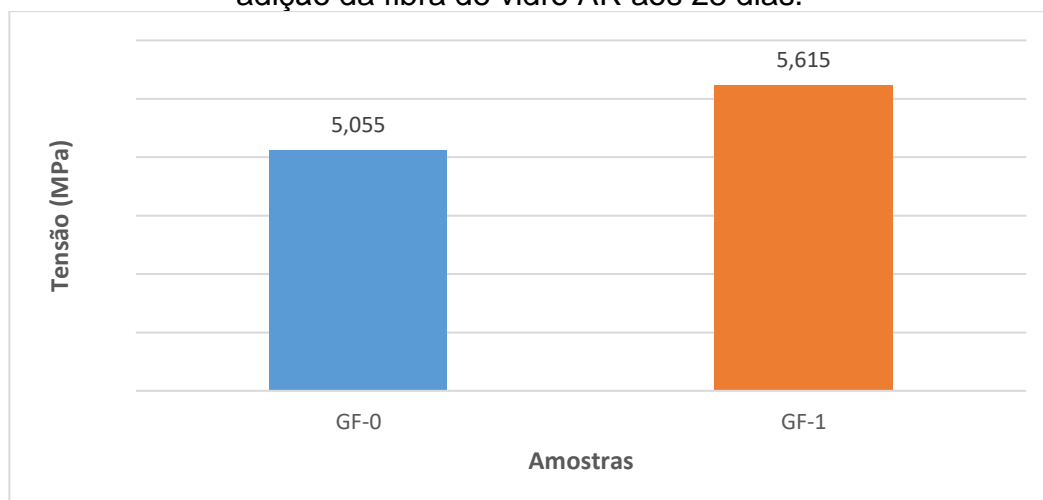
Tabela 21 - Resistência à tração com 28 dias

<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO - 28 DIAS</b>		
ID da amostra	Carga da ruptura (N)	Tensão de ruptura (fct,sp) (MPa)
<b>GF-0</b>	172.284	5,49
<b>GF-0</b>	146.393	4,62
<b>GF-1</b>	187.754	5,92
<b>GF-1</b>	167.399	5,31

Fonte: Autor (2022)

Nota-se que a adição de fibra de vidro na matriz cimentícia alterou o desempenho do compósito na resistência à tração. A ABNT NBR 7222:2011, indica que devemos analisar os resultados separadamente, mas para fim de comparação trataremos os valores máximos das amostras como referência. Desta forma, o compósito com fibra de vidro, obteve um desempenho superior de 11,07% na média das amostras em relação ao compósito sem a adição de fibra, conforme é visto na Figura 32.

Figura 32 - Resistência à tração por compressão das matrizes cimentícias com e sem a adição da fibra de vidro AR aos 28 dias.



Fonte: Autor (2022)

A pesquisa de Ali (2019) obteve resultados similares dos obtidos neste trabalho, enquanto Hilles (2019) teve um desempenho ainda superior. Ali (2019) estudou também duas matrizes cimentícias, com e sem a adição de fibra. A matriz cimentícia com a adição de fibra de vidro – com teor de 0,75% de fibra de vidro em relação ao peso do cimento, apresentou uma resistência à tração de 16,2% maior que a matriz cimentícia sem a adição de fibra de vidro após 28 dias, 3,65 MPa contra 3,14 MPa da matriz sem a adição de fibra de vidro. Enquanto Hilles (2019), com teor de 1,2% de fibra de vidro sobre o peso do cimento, obteve um ganho de 63% sobre a matriz sem a adição de fibra de vidro. O resultado expressivo obtido por Hilles (2019) é apresentado na Tabela 22, onde é feito um comparativo de desempenho do compósito em relação às referências bibliográficas utilizadas, criando uma correlação de quantidade de fibra por m<sup>3</sup> com a resistência à tração obtida. O resultado obtido por Hilles (2019) do compósito com adição de fibra é similar ao obtido pelo autor, quando feito a relação de resistência alcançada por consumo de fibra.

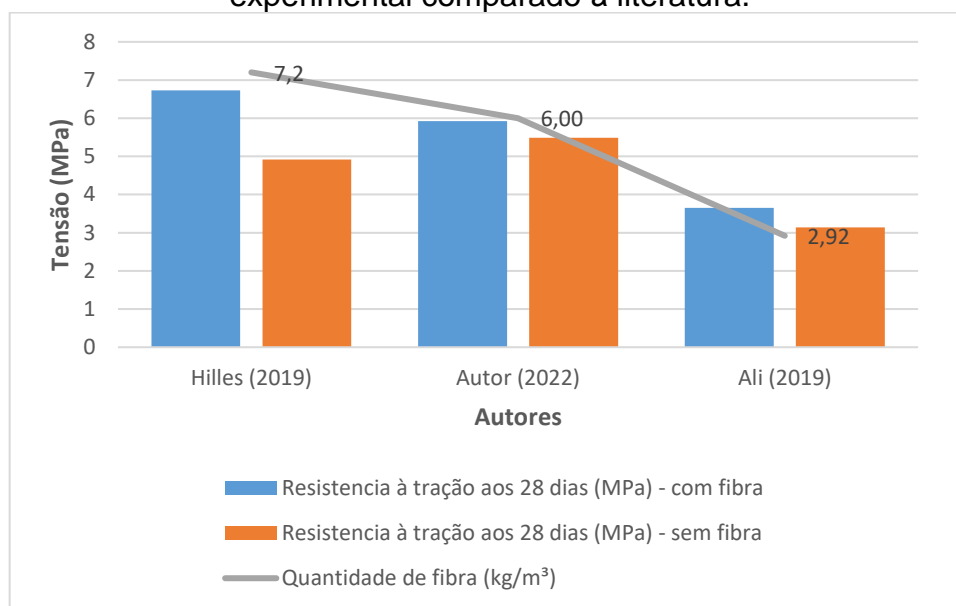
Tabela 22 - Comparativo de desempenho com referências - resistência à tração por compressão.

<b>Autores</b>	<b>Quantidade de fibra (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à tração aos 28 dias (MPa) - sem fibra</b>	<b>Resistência à tração aos 28 dias (MPa) - com fibra</b>	<b>MPa / kg de fibra</b>
<b>Hilles (2019)</b>	7,2	4,12	6,73	0,93
<b>Autor (2022)</b>	6,00	5,49	5,92	0,98
<b>Ali (2019)</b>	2,92	3,14	3,65	1,25

Fonte: Autor (2022), Hilles (2019) e Ali (2019)

Na Figura 33 é visto o desempenho das fibras pelo do consumo de fibra por m<sup>3</sup>, onde é possível observar que o desempenho do compósito está atrelado à dosagem da fibra por m<sup>3</sup>, e quanto maior a dosagem, maior será o desempenho do compósito na resistência à tração.

Figura 33 - Resistência à tração por consumo de fibras por m<sup>3</sup> da pesquisa experimental comparado à literatura.



Fonte: Autor (2022)

A GRCA (2018) indica uma faixa mínima de resistência à tração, para que um compósito com fibra de vidro possa ser caracterizado como GFRC, conforme visto na Tabela 23. Desta forma, o compósito da pesquisa experimental está de acordo com a literatura, tendo atingido 5,92 MPa de resistência à tração, no método pré-mistura (Premix).

Tabela 23 - Resistência à tração por compressão mínima para GFRC conforme a GRCA.

Tipo do GFRC	Resistência à tração (MPa)
<b>Spray-Up</b>	08 – 12
<b>Premix</b>	03 – 06

Fonte: GRCA (2018)

#### 4.2.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FIBRA DE VIDRO NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados de resistência à flexão das matrizes cimentícias, estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Resistência à tração por flexão da pesquisa experimental com e sem a adição de fibra de vidro aos 28 dias.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO - 28 DIAS		
ID da amostra	Carga da ruptura (N)	Resistência à tração na flexão (MPa)
GF-0	61.218	7,58
GF-0	60.255	7,75
GF-1	62.073	7,73
GF-1	52.696	6,73

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que a adição da fibra de vidro na matriz cimentícia não alterou suas propriedades mecânicas de resistência à flexão.

Wang (2019) atingiu resultados similares, onde foi observado que após a adição da fibra de vidro na matriz cimentícia, na proporção de 1,0%, a resistência à flexão não atingiu significativa diferença aos 28 dias, neste caso o compósito que recebeu a adição da fibra de vidro, e teve uma resistência à flexão 1,9% menor que a matriz sem a adição. Wang (2019) realizou um comparativo com quatro matrizes cimentícias, uma matriz sem adição de fibra de vidro, e outras com 0,5%, 1,0% e 1,5% respectivamente, e observou que quanto maior a dosagem de fibra de vidro no compósito, menor sua resistência à flexão aos 28 dias. Wang (2019) relacionou o desempenho do compósito na resistência à flexão pelo tamanho da fibra utilizada, onde de acordo com o autor, fibras longas – acima de 25 mm, apresentam melhor desempenho na resistência à flexão.

Kharitonov (2016), Hilles (2019), Kumar *et al.* (2020) e Ali (2019) observaram resultados diferentes. No estudo realizado por Hilles (2019), foi observado que a adição de fibra de vidro na proporção de 1,2% em uma matriz cimentícia apresentou um acréscimo de 52% na resistência à flexão aos 28 dias. A pesquisa de Kumar *et al.* (2020), constatou que a adição de fibra de vidro na proporção de 1,0% apresentou aumento de 96% na resistência à flexão aos 28 dias. Kharitonov (2016) observou que a adição de fibra de vidro na proporção de 1,5% em uma matriz cimentícia proporcionou uma resistência à flexão 49% superior em relação à matriz cimentícia que não teve adição da fibra de vidro. Já Ali (2019) observou que a adição da fibra de vidro na matriz cimentícia na proporção de 0,75% proporcionou 22% de aumento na resistência à flexão.

Observa-se desta forma, que o desempenho esperado à uma matriz cimentícia com a adição de fibra de vidro é ter acrescido sua resistência à flexão, que conforme citou a GRCA (2018) é o principal fator de desempenho de um GFRC. Correlacionando

os resultados obtidos com a literatura, é possível observar que além do teor de fibra em relação à quantidade de cimento, outro fator de importância é o tamanho da fibra. Nesta pesquisa experimental foram utilizadas fibras de 12 mm, enquanto pesquisas que obtiveram melhor desempenho de resistência à flexão utilizaram fibras de 16 mm - Khartivonov (2016) e Hilles (2019), e 18 mm – Ali (2019). Conforme já citado, Wang (2019), observou que com fibras de 25 mm, obteve um desempenho de resistência à flexão de 11% acima do compósito referência.

Entretanto, ainda assim, há uma relação direta entre o desempenho de resistência à flexão de uma matriz cimentícia, pelo do teor de fibra de vidro por m<sup>3</sup>. Na Tabela 25 é visto um comparativo de desempenho do compósito contra as referências, criando uma correlação de quantidade de fibra por m<sup>3</sup> com a resistência à flexão obtida.

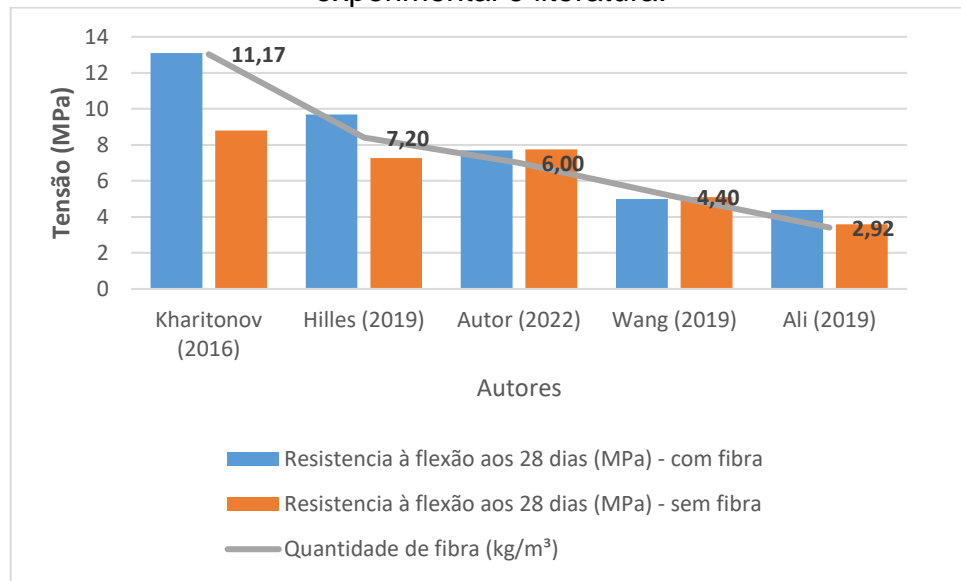
Tabela 25 - Comparativo de desempenho com as referências - resistência à tração por flexão

<b>Autores</b>	<b>Quantidade de fibra (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à flexão aos 28 dias (MPa) - sem fibra</b>	<b>Resistência à flexão aos 28 dias (MPa) - com fibra</b>
<b>Kharitonov (2016)</b>	11,17	8,8	13,1
<b>Hilles (2019)</b>	7,20	7,27	9,68
<b>Autor (2022)</b>	6,00	7,75	7,7
<b>Wang (2019)</b>	4,40	5,1	5,0
<b>Ali (2019)</b>	2,92	3,58	4,39

Fonte: Autor (2022), Kharitonov (2016), Hilles (2019), Wang (2019) e Ali (2019)

Na Figura 34 é visto o desempenho das fibras pelo do consumo de fibra por m<sup>3</sup>, onde é possível observar que o desempenho do compósito está atrelado à dosagem da fibra por m<sup>3</sup>, e quanto maior a dosagem da fibra, maior será o desempenho do compósito na resistência à flexão.

Figura 34 - Resistência à tração por flexão pelo consumo de fibras por m<sup>3</sup> da pesquisa experimental e literatura.



Fonte: Autor (2022)

Conforme citou Guimarães (2016), a resistência à flexão depende de fatores, percentual de fibra de vidro, composição dos elementos da mistura, método de fabricação e cura após fabricação. A GRCA (2018) indicou uma faixa mínima de resistência à flexão, para que um compósito com fibra de vidro possa ser caracterizado como GFRC, conforme é visto na Tabela 26.

Desta forma, pode-se dizer que mesmo não atingindo o desempenho da literatura, ainda assim a resistência à flexão da pesquisa experimental está dentro do indicado pela GRCA (2018) para um compósito de GFRC.

Tabela 26 - Resistência à tração por flexão mínima para GFRC conforme GRCA.

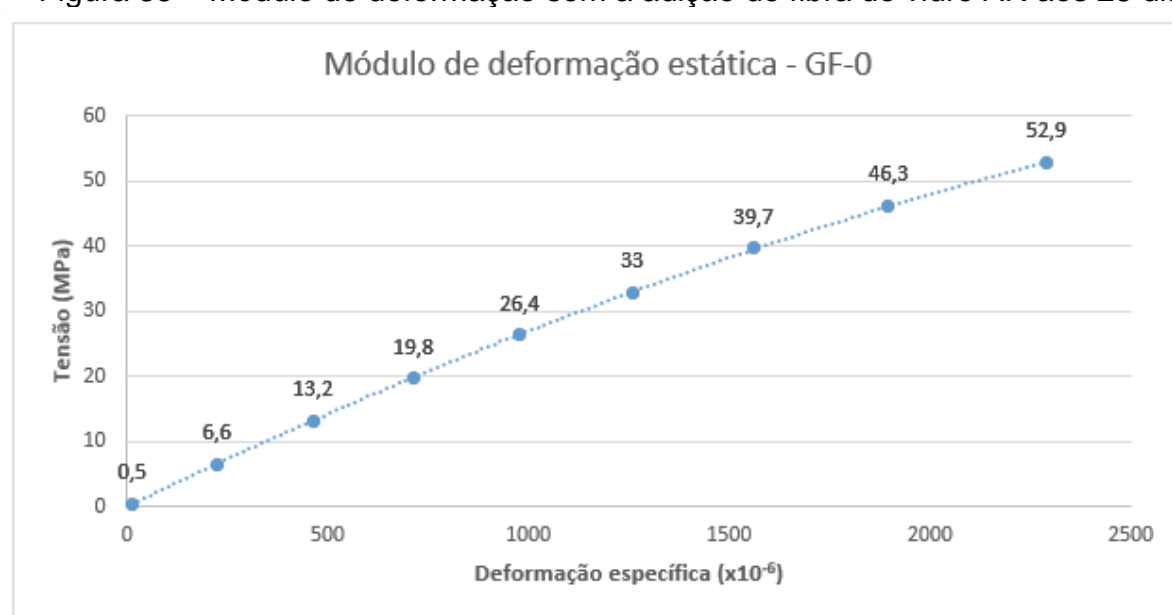
Tipo do GFRC	Resistência à flexão (MPa)
<b>Spray-Up</b>	08 – 12
<b>Premix</b>	05 – 14

Fonte: GRCA (2018)

#### 4.2.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FIBRA DE VIDRO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE

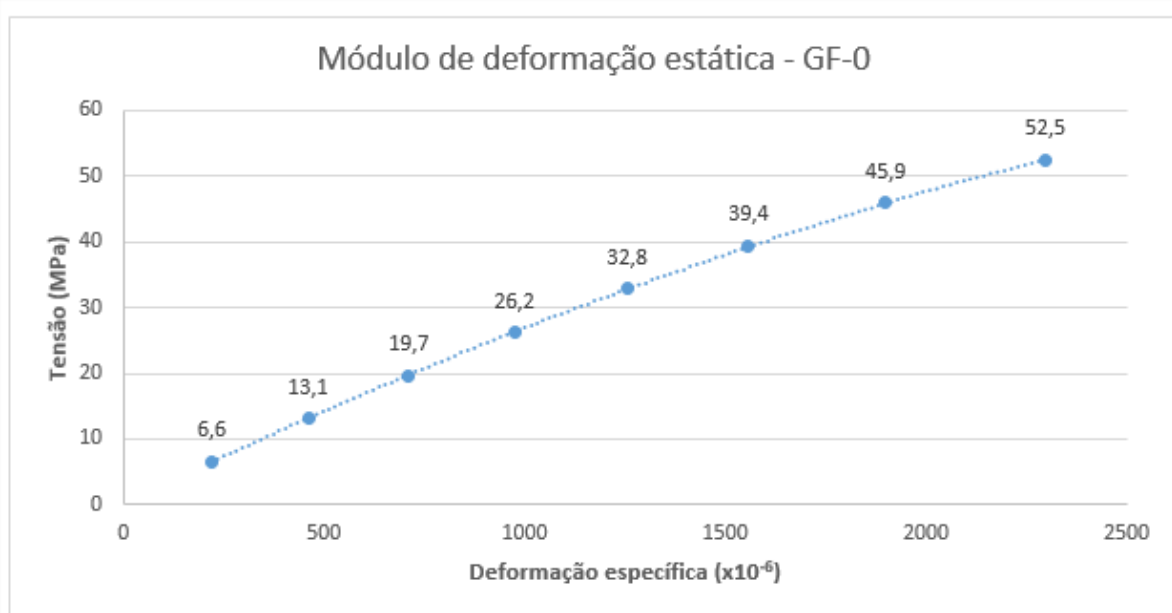
Os gráficos dos resultados dos módulos de elasticidade e da deformação à compressão das matrizes cimentícias sem a adição de fibra (GF-0), pelo módulo secante, estão apresentados na Figura 35 e Figura 36.

Figura 35 – Módulo de deformação sem a adição de fibra de vidro AR aos 28 dias.



Fonte: Autor (2022)

Figura 36 - Módulo de deformação sem a adição de fibra de vidro AR aos 28 dias.

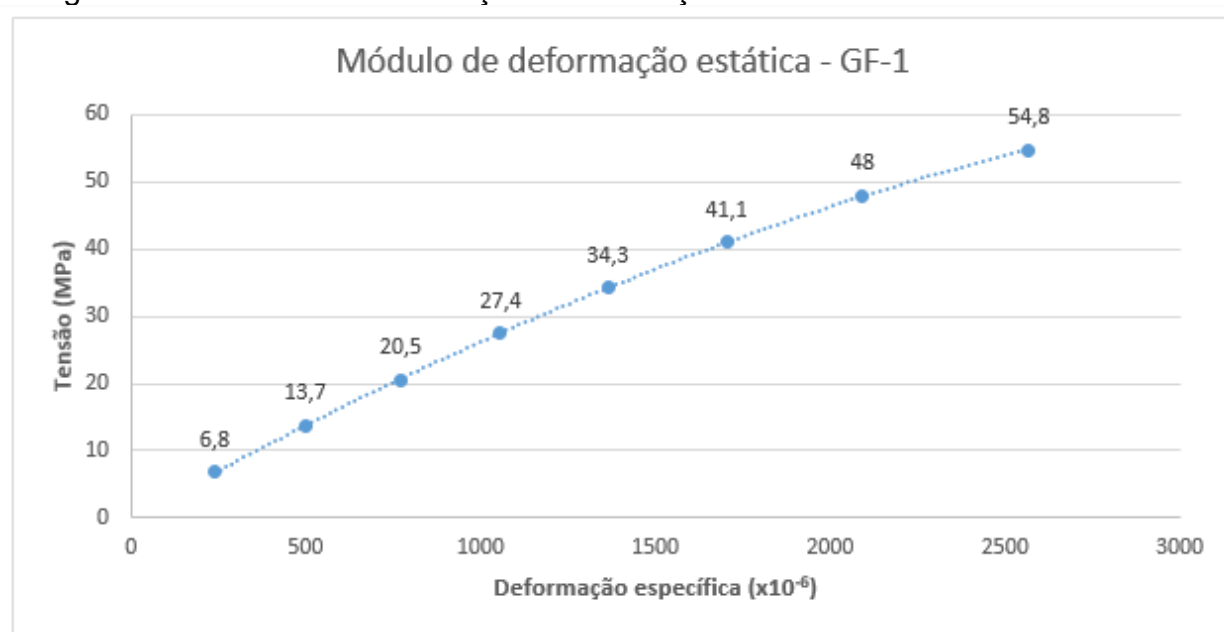


Fonte: Autor (2022)



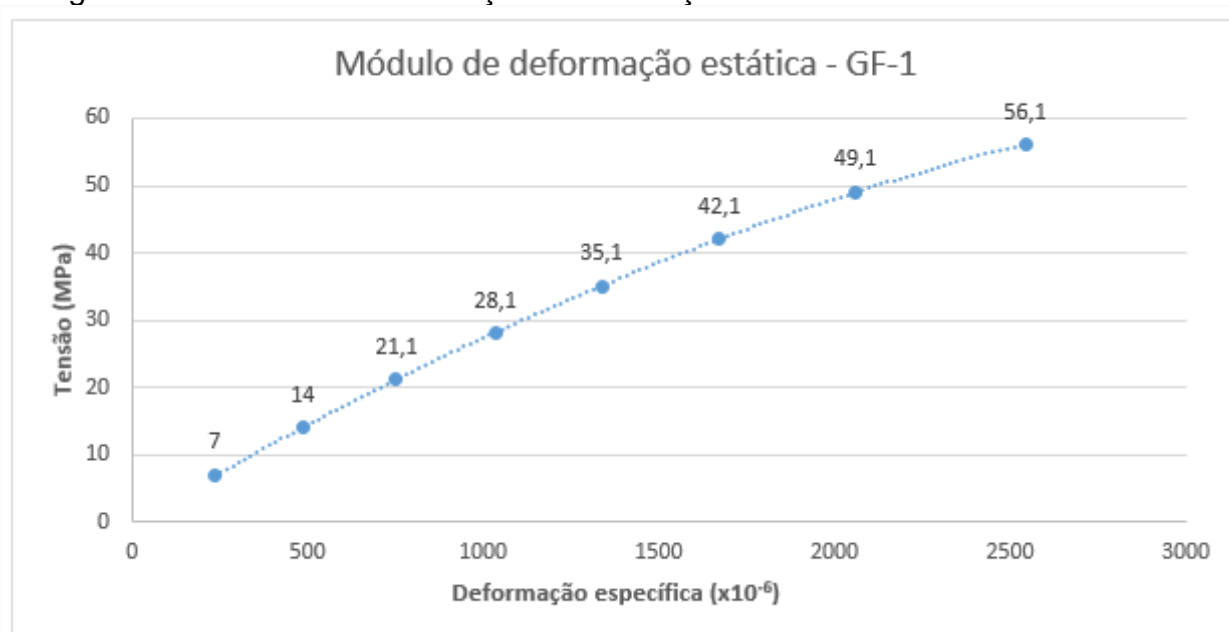
Os gráficos dos resultados dos módulos de elasticidade e da deformação à compressão das matrizes cimentícias com a adição de fibra (GF-1), pelo módulo secante, estão apresentados na Figura 37 e Figura 38.

Figura 37 - Módulo de deformação com a adição de fibra de vidro AR aos 28 dias.



Fonte: Autor (2022)

Figura 38 - Módulo de deformação com a adição de fibra de vidro AR aos 28 dias.



Fonte: Autor (2022)

Na Tabela 27 é visto os resultados obtidos do módulo de deformação secante, onde constata-se que o compósito sem a adição de fibra de vidro, apresentou desempenho mecânico superior de 8%.

Tabela 27 - Módulo de deformação secante das amostras da pesquisa experimental com e sem fibra de vidro aos 28 dias.

<b>ID da amostra</b>	<b>Módulo de deformação Secante (GPa)</b>
GF-0	23,0
GF-0	22,7
GF-1	21,3
GF-1	22,0

Fonte: Autor (2022)

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), há uma correlação direta entre a origem do agregado, e a porosidade da matriz cimentícia com o módulo de elasticidade de uma matriz cimentícia. Pois, quanto menor for a densidade do agregado, menor será o desempenho mecânico.

O módulo de elasticidade secante de um material cimentício de acordo com a ABNT 8522:2021, é obtido pelo resultado da tangente da tensão aplicada dividida pela deformação específica. A ABNT NBR 6118:2014, cita que quando não forem realizados ensaios de obtenção do módulo de elasticidade conforme a ABNT NBR 8522:2021, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade. Nesse contexto, o módulo de elasticidade, e uma correlação da resistência à compressão e da origem do agregado, tendo o arenito, o mais baixo coeficiente de conversão, tendo um fator de redução de 30%, quando comparado à agregados de origem granítica, por exemplo. Desta forma, entende-se que além da fibra de vidro não melhorar o desempenho do compósito quando comparado à matriz sem a fibra, a origem do agregado impactou no desempenho do módulo de elasticidade do compósito.

O resultado coincide com a literatura. Kizilkanat (2015), realizou um estudo com de GFRC com agregado de calcário – que de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, também necessita de fator de redução, e observou que a adição da fibra de vidro não apresentou efeito no módulo de elasticidade. A matriz cimentícia com a adição de 0,5% de fibra de vidro apresentou decréscimo de 7% de módulo de elasticidade, enquanto a matriz cimentícia que teve dosagem de fibra de vidro de 1% teve 4% a menos de módulo de elasticidade comparado à matriz cimentícia sem fibra aos 28 dias.

## 5 CONCLUSÃO

O desempenho mecânico de um concreto reforçado com fibra de vidro, também conhecido como GFRC foi avaliado neste trabalho a partir da dosagem de dois traços. Um destes com a adição de fibra de vidro e o outro sem a adição, analisados comparativamente em relação aos ensaios de resistência à compressão, tração, flexão, e módulo de elasticidade. Ainda, os dados obtidos foram correlacionados ao determinado pelas normas vigentes de GFRC para o uso em painéis de fechamento e discutidos relativamente à trabalhos recentes da literatura.

A avaliação realizada dos processos produtivos da indústria de pré-fabricação, permitiu entender a possível utilização do GFRC no setor. Visto que o GFRC em seu estado fresco, é um compósito com características similares ao concreto tradicional, buscou-se realizar um estudo com a finalidade de comparar respectivos materiais no estado endurecido.

Os agregados foram selecionados para o desenvolvimento do estudo, tendo características físicas similares às das referências, permitindo com que o desenvolvimento do traço fosse feito de acordo com a literatura. A escolha de um cimento que não apresentasse baixo tempo de início de pega foi fundamental para controle da hidratação, enquanto a utilização do superplastificante permitiu que a relação a/c fosse mantida para os dois compósitos.

Foi possível verificar que o compósito com a adição de fibra de vidro apresentou menor abatimento, enquanto o mesmo teve um melhor desempenho na resistência à compressão. Não foram observadas alterações na massa específica fresca com a adição de fibra, nem na resistência à tração na flexão, fatores inerentes ao material em estudo na proporção utilizada, como citado na correlação com a literatura.

Observou-se comparando os resultados obtidos à literatura, que o desempenho (plasticidade e resistência mecânica) de um compósito de GFRC está relacionado com a quantidade e o tamanho da fibra de vidro utilizada, precisando serem desenvolvidos estudos a cada aplicação, para se descobrir o teor ótimo a ser incorporado.

Desta forma, entende-se que a quantidade de fibra de vidro, bem como seu tamanho foram insuficientes para o objetivo proposto, devido à diferença entre o compósito com e sem fibra de vidro ter sido mínima. Entretanto, os resultados obtidos permitiram ter um maior entendimento sobre o desempenho mecânico de compósitos

cimentícios reforçados com fibras de vidro do tipo AR, apresentando a influência da fibra, além de demonstrar que há potencial de melhoria em futuras pesquisas.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos trabalhos recomenda-se: (1) Avaliar a utilização de maiores adições de fibra de vidro do tipo AR (acima de 2% em relação ao peso do cimento), para que a fibra de vidro possa proporcionar matrizes cimentícias que não necessitem de telas metálicas. (2) Avaliar o comportamento das fibras de vidro do tipo AR com maiores comprimentos (acima de 18 mm) na resistência à flexão do compósito. (3) Avaliar o desempenho do compósito de GFRC com processo de degradação acelerada, verificando possíveis reações da fibra de vidro com os álcalis do cimento com o passar do tempo.

## REFERÊNCIAS

- ACI COMMITTEE 544.4R-18 **Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete**, 2018.
- ABNT NBR 5738 - **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**, Rio de Janeiro, 2015
- ABNT NBR 5739 - **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2018
- ABNT NBR 6118 - **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014
- ABNR NBR 7211 - **Agregados para concreto – Especificação**, Rio de Janeiro, 2009
- ABNT NBR 7222 - **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2011
- ABNT NBR 8522 - **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação**, Rio de Janeiro, 2021
- ABNT NBR 9062 - **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**, Rio de Janeiro, 2017
- ABNT NBR 9833 - **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**, Rio de Janeiro, 2008
- ABNT NBR 12142 - **Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**, Rio de Janeiro, 2010
- ABNT NBR 12655 - **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**, Rio de Janeiro, 2022
- ABNT NBR 12821 - **Preparação de concreto em laboratório - Procedimento**, Rio de Janeiro, 2009
- ABNT NBR 15305 - **Produtos pré-fabricados de materiais cimentícios reforçados com fibra de vidro - Procedimentos para o controle da fabricação**, Rio de Janeiro, 2005
- ABNT NBR 15530 - **Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio**, Rio de Janeiro, 2019
- ABNT NBR 15900 – **Água para amassamento do concreto – Requisitos**, Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT NBR 16475 - **Painéis de parede de concreto pré-moldado - Requisitos e procedimentos**, Rio de Janeiro, 2017

ABNT NBR 16697 - **Cimento Portland - Requisitos**, Rio de Janeiro, 2018

ABNT NBR 16889 - **Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**, Rio de Janeiro, 2020

ABNT NBR 16972 – **Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios**, Rio de Janeiro, 2021

ACKER, A. V. - **Manual de sistemas pré-fabricados de concreto**. 2002

ALLEN, H. G. - **The Properties of Fibre Composites, Conference Proceedings, National Physical Laboratory**, IPC Science and Technology Press Ltd. 1971

ALI, B. *et al.* - **Influence of Glass Fibers on Mechanical Properties of Concrete with Recycled Coarse Aggregates** - Civil Engineering Journal. 2019.

AMBROISE, J. *et al.* - **Influence of polyether polyol on the hydration and engineering properties of calcium sulfoaluminate cement**. Cement and Concrete Composites. 2009

ASHBY, M.F.; JONES, D.R.H. **Engineering materials volume 2: An introduction to microstructures, processing and design**. 2 ed., 384 p., 1998.

AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A. - **The Properties of Fibre Composites, Conference Proceedings**, National Physical Laboratory, IPC Science and Technology Press Ltd. 1971

BARTOS, P.J.M.; ZHU, W. **Effect of microsilica and acrylic polymer treatment on the ageing of grc**. Cement and Concrete Composites, 1996.

BASALT CORE. **Portfólio**. Disponível em: <<http://www.basaltcore.com/portfolio>>. Acesso em: fevereiro de 2021.

BRANCH, J.L; EPPS, R; KOSSON, D. S. - **The impact of carbonation on bulk and ITZ porosity in microconcrete materials with fly ash replacement**. Cement and Concrete Research. 2017

BENTUR, A.; DIAMOND, S. **Effect of ageing of glass fibre reinforced cement on the response of a crack on intersecting a glass fibre strand**. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, vol 8, 1986.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. London and New York: Modern Concrete Technology Series, 2. ed. 2007

BOGGIO, Aldo J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 180 p. Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. 2000.

BRITISH STANDARD INSTITUTION – BSI. **Code for practice for: design and installation of non-loadbearing precast concrete cladding**. London, 2000

CALLISTER JR, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais– Uma Introdução**. 5 ed., 590 p., LTC, 2002.

CEM-FIL; OWENS CORNING. Cem-FIL, **GRC Technical Data**, Madrid, 2020.

CONCRETO & FIBRA. **Microfibra de polipropileno**. Disponível em: <<http://www.concretoefibra.com.br/microfibra-polipropileno/>>. Acesso em: fevereiro de 2021.

COMINO, P. I.; ROMERO, J. C. **EL GRC Material Compuesto de Matriz Cimenticia reforzado con fibra de vidrio AR**. In: CURSO DE ESTUDIOS MAYORES DE LA CONSTRUCCIÓN, 2007, Madrid. Anais. Madrid: Instituto de Ciencias de La Construcción Eduardo Torreja, 2007. p. 459 - 477.

DEBS EI, KHALIL Mounir, **Concreto Pré-Moldado**, 2 ed, 2017.

ENFOQUE. **Uma onda de concreto branco e leve**. Disponível em <<http://ww16.enfoque.com/>>. Acessado 16/01/2021.

ETRURIA. **Microfibra de polipropileno em multifilamentos**. Disponível em: <<http://www.etruriaengenharia.com.br/>>. Acesso em fevereiro de 2022.

ETXEBERRIA, M.; REDDY, B. T. - **Effect of Supplementary Cementitious Material and Fine Recycled Aggregates on Shrinkage Properties of Self-Compacting Microconcrete**. XV International Conference on Durability of Building Materials and Components. 2020

FERREIRA, J.G. BRANCO, F.A. **Construction and Building Materials 21**. 2007.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. [s.l.] teses.usp.br, 2011.

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. **Concreto com fibras**. Concreto. Ensino Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005 v.2

FUSCO, P.B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1995

GLASSFIBRE REINFORCED CONCRETE ASSOCIATION - GRCA - **Practical Design Guide for Glassfibre Reinforced Concrete**. 2018

GUIMARÃES, J.R.B. - **Painéis pré-fabricados**, 2016

HANNANT, D. J. **Fiber Cements and Fiber Concretes**. 209 p., Guildford, United Kingdom: John Wiley & Sons, 1978.

HASHEMPOUR M., HEIDARI A., JOUNAGHANI M.S. **The Evaluation of the Stress-Strain Characteristics of MCC Concrete**. Materials Today Communications, Volume 23, 2020.

HELENE, P. **Dosagem do Concreto de Cimento Portland**, In: ISAIA, G. C., Editor. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. Ed. IBRACON, São Paulo, v. 1, p. 75- 107, 2005.



- HILLES, M. M.; ZIARA, M. M. - **Mechanical behavior of high strength concrete reinforced with glass fiber**, Engineering Science and Technology, an International Journal 22. 2019
- JIAO, D. *et al.* - **Effects of rotational shearing on rheological behavior of fresh mortar with short glass fiber**, Construction and Building Materials. 2019
- KADAM, G. C. - **A Research on Performance Study and Utilization of Micro concrete**. 2020
- KHARITONOV, A. RYABOVA, A. PPUKHARENKO, Y. **Modified GFRC for durable underground construction**, 2016
- KIZILKANAT, A. *et al.* - **Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study**, Construction and Building Materials. 2015.
- KUMAR, D.; REX, L. K. - **High performance glass fiber reinforced concrete**, Materials Today: Proceedings. 2020
- LAKSHMI, V. GIDEON, A. - **Experimental Investigation On Self-Healing Bacterial Concrete**, International Journal Of Research In Engineering And Technology. 2016
- LAMEIRAS, R. D. M. **Contribuição ao estudo das propriedades dos materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro (glass fiber reinforced cement – grc)**. 2007.
- LIGA QUÍMICA. **Ficha técnica Flow 703**, 2021.
- LIMA, P. R. L.; TOLEDO, R. D.; NEUMANN, R.; BARROS, J. A. O. - **Efeito do envelhecimento acelerado sobre as propriedades de microconcreto reforçado com fibras longas de sisal**. 2019
- LYU, L. L.; CHAGWEI W.; YING L.; JING G. J.; **Sound absorption, thermal, and flame retardant properties of nonwoven wall cloth with waste fibers**. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 15. 2020
- HAQUE, M. N.; KAWAMURA, M. **Carbonation and chloride induced corrosion of reinforcement in fly ash concretes**. ACI Material Journal, vol.89, No 01, p. 41 - 48, January - February, 1992
- MACCAFERRI. Ilustração de concreto com fibra. Disponível em: <<https://www.maccafferri.com/br/produtos/fibras/>>. Acesso em: fevereiro de 2021.
- MAGALHÃES, A.G.; MARQUES, A.T.; OLIVEIRA, F.M.F.; SOUKATCHOFF, P.; CASTRO, P.T. de. **Mechanical Behaviour of Cementitious Matrix Composites**. Cement and Concrete Composites. 1996.
- MAIDL, B. Sthahfaserbeton. **Ernst & Sohn Verlag fur Architeker und technishe Wiessenschaften**, Berlin, 1991.
- MAJUMDAR, A.J. LAWS, V. **Glass Fiber Reinforced Cement**. Oxford: BSP Professional Books, 1991

- MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing: materials, product, and process, engineering.** Boca Raton, 2001
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.; FILHO, A. C. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** Ibracon, 2014.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Pini, 1997.
- ROMERO, Luiz Lauro *et al.* **Fibras artificiais e sintéticas.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 1 , p. [54]-66, jul. 1995
- ORTENZI, J.A. **A fibra de vidro em matrizes poliméricas e cimentícias e seu uso estrutural em construção civil - São Carlos, 2007**
- OWENS CORNING. **Ficha técnica fibra de vidro tipo AR.** 2020
- PERUZZI, A.P. - **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de Cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa,** 2002
- PROCTOR, B.A. **A Review of the Theory of GRC. Cement and Concrete Composites.** v. 12, 1990
- PRISZKULNIK, S. **Reações Expansivas no Concreto.** In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Concreto: Pesquisa, Desenvolvimento e Realizações.** I ed. v. II São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, p. 1017-1070.
- Reyes-Araiza, J.L. *et al.* - **Comparative Study on Tensile Behavior of Inorganic Fibers Embedded in Unsaturated Polyester Bisphenol “A”–Styrene polymer,** 2008
- SERRA, S. M. B. FERREIRA, M. de A.; PIGOZZO, B. N. **Evolução dos pré-fabricados de Concreto. Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-moldados (NET-PRÉ),** Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, 2005.
- SOUZA SANTOS, P. - **Ciência e tecnologia de argilas.** 1992
- SUPREMO CIMENTOS. **Ficha técnica, CP II F 40.** 2021
- TANOBE, E. S. O.; *et al.* - **Avaliação mecânica de concretos com adição de fibras de Açaí e Curauá,** Revista técnico-científica do Crea-PR, 2019
- TAKATA, L.T. **Aspectos executivos e a qualidade de estruturas em concreto armado,** São Carlos, 2009
- TECNOSIL, **Ficha técnica Sílica ativa,** 2020
- TORRES, A. S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: Uma meta-análise,** Porto Alegre, 2011
- ZOLLO, R.F. **Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development.** **Cement and Concrete Composites,** v. 19, 1997

WANG, W.; WANG, H.; CHANG, K.; WANG, S. - **Effect of high temperature on the strength and thermal conductivity of glass fiber concrete**, Construction and Building Materials. 2019