



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ITAITUBA – CITB**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ELIS REGINA MARTINS SILVA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO REFORÇADO**  
**COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

**ITAITUBA/PA**

**2024**

**ELIS REGINA MARTINS SILVA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO REFORÇADO  
COM FIBRAS DE POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Itaituba, como requisito para a obtenção de grau de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Me. Jonas dos Santos Leite.

**ITAITUBA/PA**

**2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas (SIBI) da UFOPA  
Catalogação de Publicação na Fonte  
UFOPA - Biblioteca Campus Itaituba

Silva, Elis Regina Martins.

Análise do comportamento de vigas de concreto reforçado com fibras de polipropileno / Elis Regina Martins Silva. - Itaituba, 2024.

52 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus de Itaituba, Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Jonas dos Santos Leite.

1. Concreto com fibras. 2. Fibras de polipropileno. 3. Vigas de concreto. I. Leite, Jonas dos Santos, orient. II. Título.

UFOPA/Biblioteca Campus de Itaituba

CDD 691.3



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ITAITUBA  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Ao décimo dia do mês de maio do ano de dois mil e vinte e quatro, às 16:00h, realizou-se no auditório do Campus Universitário de Itaituba, a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Elis Regina Martins Silva**, intitulado “**Análise do comportamento de vigas de concreto reforçado com fibras polipropileno**”, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Os trabalhos foram conduzidos pelo professor Jonas dos Santos Leite, orientador do discente e presidente da Banca Examinadora, constituída também, pelos membros convidados Andrews Malone Pontes da Costa e Luamim Sales Tapajós. Após apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso, a Banca Examinadora passou à arguição do discente. Encerrados os trabalhos de arguição, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre a apresentação e defesa oral do discente, considerando-o APROVADA com Nota: 10. Proclamados os resultados pelo presidente da Banca, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu Jonas dos Santos Leite, na qualidade de professor orientador do Trabalho de Conclusão de Curso avaliado, lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da Banca Examinadora.

Itaituba - PA, 10 de maio de 2024.

Presidente/orientador(a): Jonas dos Santos Leite

Membro: Andrews Malone P. da Costa

Membro: Luamim Sales Tapajós

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha família e amigos, e aqueles que fizeram parte direta ou indiretamente, esta conquista também é de vocês.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ser meu sustento ao longo de toda caminhada na vida acadêmica, e por me dar forças e sabedoria para concluir todo o processo. Aos meus pais, Elisângela Paz Martins e Reginaldo da Conceição Silva, por todo amor e carinho durante toda jornada acadêmica, sendo minha base e estrutura, exemplos de pais maravilhosos que me tornaram a pessoa que sou hoje, sempre me encorajando a continuar e me mostrando que sou capaz de alcançar todos os meus sonhos, meus sinceros agradecimentos. A minha irmã Elinara Martins Silva e ao meu companheiro Andrey Gabriel Rocha Barbosa, por sempre estarem dispostos a me ajudar, me incentivar e afirmar o quanto sou forte, que apesar das dificuldades eu iria conseguir, saibam que foram imprescindíveis no meu percurso.

Ao meu amigo, professor e orientador mestre Jonas dos Santos Leite, por acreditar no meu potencial, pela paciência, pelas orientações durante todas as etapas, motivações e conversas durante minha trajetória, e por ser exemplo de profissional e pessoa excepcional, saiba que terei gratidão eterna por tudo que fizeste por mim. E ao professor Andrews Malone por todo apoio.

A empresa do Grupo ACARÍ, pelo apoio e colaboração com as ferramentas de trabalho e com o Laboratório de materiais de construção, bem como ao Laboratório de Tecnologia da Madeira do Instituto de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Santarém, para realização dos ensaios mecânicos.

E aos meus amigos do curso de Engenharia civil, que me incentivaram a não desistir, Joane Cabral, Anne Beatriz, Adriele Santos, Murillo Pinho, Sérgio Freitas, Adler Miranda, Cledwilson Santos, Fernando Lemos, Arthemio Pereira, Thiago Castro, Larissa Miranda, Ediene Fernandes, Renan Guimarães, Taize Riato e Raimunda Stefany, que não mediram esforços quando mais precisei, saibam que o apoio de vocês foi fundamental.

## RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento de vigas de concreto reforçado com fibras de polipropileno. Este tipo de reforço tem sido cada vez mais utilizado na construção civil, com o intuito de melhorar as propriedades à tração do concreto, combater a propagação de microfissuras por retração, melhorar a capacidade de impacto e durabilidade das estruturas de concreto. Para isso, foi realizado um estudo experimental em doze vigas de concreto de dimensões (150x150x600mm) reforçadas com fibras de polipropileno variando em quatro grupos a 0,35%, 0,45% e 0,55% fibras por m<sup>3</sup> de concreto e de referência sem fibras. Para análise, foram realizados ensaios mecânicos em quatro pontos seguindo as recomendações da NBR 12142 (ABNT, 2010), foi avaliado a influência das fibras na contribuição da resistência à tração na flexão. Os resultados obtidos mostraram que as vigas reforçadas com fibras de polipropileno a 0,35% de fibras/m<sup>3</sup> apresentaram um aumento significativo na sua resistência em comparação com os demais grupos com e sem reforço de fibras. Todos os grupos com fibras apresentaram mudança do comportamento frágil para um comportamento dúctil. Além disso, as vigas com 0,55% de fibras apresentaram maior ductilidade, porém menor contribuição na resistência à tração. Com base nos resultados, conclui que o uso de fibras de polipropileno como reforço em vigas de concreto é eficiente. No entanto, é importante ressaltar que são necessários estudos complementares para aprofundar o conhecimento sobre o desempenho desses materiais em diferentes situações.

**Palavras-Chaves:** Concreto com fibras, Fibras de polipropileno, Vigas de concreto.

## ABSTRACT

This research aims to analyze the behavior of concrete beams reinforced with polypropylene fibres. This type of reinforcement has been increasingly used in construction, with the aim of improving the traction properties of concrete, combating the spread of microcracks by retraction, improve the impact capacity and durability of the concrete structures. For this purpose, an experimental study was carried out on twelve concrete beams of dimensions (150x150x600mm) reinforced with polypropylene fibres ranging in four groups at 0.35%, 0.45% and 0.55% fibres per m<sup>3</sup> of concrete and reference without fibres. For analysis, mechanical tests were carried out in four points following the recommendations of NBR 12142 (ABNT, 2010), the influence of fibres on the contribution of traction resistance in flexion was assessed. The results obtained showed that the beams reinforced with polypropylene fibres at 0.35% fibres/m<sup>3</sup> showed a significant increase in their strength compared to the other groups with and without fiber reinforcement. All fibrous groups showed a change from fragile to ductile behavior. In addition, the beams with 0.55% fibres showed greater ductility, but less contribution in traction resistance. Based on the results, it concludes that the use of polypropylene fibres as reinforcement in concrete beams is efficient. However, it is important to stress that additional studies are needed to deepen knowledge about the performance of these materials in different situations.

**Keywords:** Concrete with fibers, Polypropylene Fibers, concrete Beams.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mecanismo de aumento de tenacidade à flexão do concreto com fibra. ....	18
Figura 2 - Tipos de fibras de polipropileno. ....	19
Figura 3 - Comportamento das fibras na matriz do concreto. ....	20
Figura 4 - Concentração de tensões e transferência de tenções em concreto com e sem fibras. .....	20
Figura 5 - Dispositivo de ensaio (perspectiva). ....	23
Figura 6 - Dispositivo de ensaio de flexão de quatro pontos.....	23
Figura 7 - Ruptura fora do terço médio. ....	24
Figura 8 - Corpos de prova em detalhe com fissuras até seu rompimento. ....	25
Figura 9 - Trajetória das fissuras no concreto sem fibras. ....	27
Figura 10- Trajetória das fissuras no concreto com fibras. ....	27
Figura 11 - Ensaio de resistência à tração na flexão.....	28
Figura 12 - Características geométricas das vigas (Unidades em milímetros).....	30
Figura 13 - Sistema de ensaio de 4 pontos para vigas (Unidades em milímetros).....	31
Figura 14 - Montagem do Sistema de ensaio de 4 pontos para vigas.....	31
Figura 15 - Caracterização do Cimento Portland CII F 32.....	33
Figura 16 - Processo de secagem do agregado miúdo.....	33
Figura 17 - Processo caracterização e de secagem do agregado graúdo. ....	34
Figura 18 - Consistência e trabalhabilidade (Slump test do Concreto). ....	35
Figura 19 - Moldagem dos corpos de prova. ....	35
Figura 20 - Pesagem do teor de fibras de polipropileno.....	36
Figura 21 – Preparação da forma para as vigas. ....	37
Figura 22 - Preparação do concreto com fibra manual em betoneira. ....	37
Figura 23 - Processo de concretagem das vigas. ....	38
Figura 24 - Processo de cura das vigas.....	38
Figura 25 - Desformas das amostras de vigas. ....	39
Figura 26 - Ensaio de compressão axial dos corpos de prova. ....	40
Figura 27 - Ensaio de tração na flexão.....	41
Figura 28 – Ensaio vigas 0% de fibras.....	42
Figura 29 – Ruptura brusca do concreto.....	42
Figura 30 – Qualidade do concreto vigas 0% de fibras.....	43
Figura 31 – Tensão x deslocamento ( $\sigma$ x $d$ ) vigas 0% de fibras.....	43

Figura 32 – Tensão x deslocamento ( $\sigma$ x d) vigas 0,35% de fibras.....	44
Figura 33 – Qualidade do concreto vigas 0,35% de fibras.....	44
Figura 34 – Detalhamento do concreto vigas 0,35% de fibras.....	45
Figura 35 – Falha de ancoragem vigas 0,35% de fibras.....	45
Figura 36 – Tensão x deslocamento ( $\sigma$ x d) vigas 0,45% de fibras.....	46
Figura 37 – Qualidade do concreto vigas 0,45% de fibras.....	46
Figura 38 – Detalhamento da ancoragem das fibras - vigas 0,45% de fibras.....	47
Figura 39 – Distribuição das fibras a 0,45%. .....	47
Figura 40 – Tensão x deslocamento ( $\sigma$ x d) vigas 0,55% de fibras.....	48
Figura 41 – Qualidade do concreto vigas 0,55% de fibras.....	48

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Determinação dos parâmetros de resistência à tração na flexão para os consumos de 3, 4.5, e 6 kg/m <sup>3</sup> de fibra de polipropileno e 15, 25, e 35 kg/m <sup>3</sup> de fibra de aço. ....	26
Tabela 2 - Resultados vigas sem fibras de aço. ....	27
Tabela 3 - Resultado vigas com fibras de aço. ....	27
Tabela 4 - Propriedades físicas das microfibras de polipropileno. ....	28
Tabela 5 - Relação de amostras de vigas. ....	30
Tabela 6 - Consumo de materiais para a fabricação do concreto. ....	34
Tabela 7 - – Resultado ensaio de compressão axial. ....	41
Tabela 8 - Resultado ensaio de tração VP 0% de Fibras. ....	42
Tabela 9 - Resultado ensaio de tração VP 0,35% de Fibras. ....	44
Tabela 10 - Resultado ensaio de tração VP 0,45% de Fibras. ....	46
Tabela 11 - Resultado ensaio de tração VP 0,55% de Fibras. ....	48

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAPRE	Associação Nacional de Pisos e Revestimentos
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CMOD	Medida de Abertura do Entalhe
CP	Cimento Portland
CP's	Corpo de Prova
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CRFP	Concreto Reforçado com Fibras de Polipropileno
EN	Normas Europeias
FQP	Fadiga Quatro Pontos
GPa	Giga Pascal
LOP	Limite de Proporcionalidade
MPa	Mega Pascal
RCD	Resistência à Compressão Diametral
RCS	Resistência à Compressão Simples
VCRFP	Vigas de Concreto Reforçado com Fibras de Polipropileno

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.2 Geral .....	15
1.1.3 Específicos .....	15
1.2. JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1 CONCRETO COM FIBRAS – PROPRIEDADE .....	17
2.2 FIBRA DE POLIPROPILENO .....	18
2.3 RECOMENDAÇÕES E NORMATIVAS PARA CRF .....	21
2.3.1 NBR 16940 (ABNT, 2010): Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão – Método de ensaio. ....	21
2.3.2.1 Procedimentos de Cálculos.....	24
<b>3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE OUTROS PESQUISADORES.....</b>	<b>25</b>
3.1 SILVA <i>ET AL.</i> , 2019. ....	25
3.2 PERES <i>ET AL.</i> , 2011. ....	25
3.3 SANTOS <i>ET AL.</i> , 2020. ....	26
3.4 CUNHA, W. A., 2022. ....	28
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>29</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS DE CRFP .....	29
4.2 SISTEMA DE ENSAIO .....	30
4.2.1 Índice de ductilidade.....	32
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	32
4.3.1 Dosagem .....	32
4.3.2 Concreto .....	35
4.3.3 Fibras .....	35
4.3.4 Preparação das vigas com Fibras.....	37
<b>5 DISCUSSÃO E RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
5.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA A COMPRESSÃO.....	40
5.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	41
5.2.1 Viga de Referência (0% de Fibras).....	41
5.2.2 Viga (0,35% de Fibras).....	43
5.2.3 Viga (0,45% de Fibras).....	46

5.2.4 Viga (0,55% de Fibras).....	47
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a indústria da construção civil vem apresentando um desenvolvimento dinâmico e acelerado, buscando melhorias em todos os setores, como, conservação, habitação, desenvolvimento econômico por meio de vias de transporte, saneamento básico, energias alternativas e até mesmo soluções e pesquisas voltadas para o setor espacial. A necessidade por melhorias vem contribuindo cada vez mais para o progresso de estudos e da sociedade, (Trichês, 1993).

A evolução de novos materiais se deu a passos lentos, pois não se conheciam as propriedades, e não tinham o domínio completo de suas características nem os benefícios que poderiam trazer. Sendo em sua grande maioria o emprego de materiais com características em época pouco conhecida, como: as pedras, a areia e a madeira, pois já conheciam algumas de suas características e propriedades, (Bauer, p.2, 2019).

Com o passar do tempo os padrões das construções elevaram, aumentando sua robustez, requerendo de técnicas e o aprimoramento de materiais capazes de atender as exigências das construções. Por consequência, exigiu-se dos materiais maior resistência e durabilidade (Bauer, p.2, 2019).

Nesse contexto, com a evolução dos materiais, destaca-se o concreto, material que produzido apresenta características semelhante ao papel da pedra bruta, o que torna o concreto amplamente utilizado em todo mundo, nas obras de construções, principalmente por ter uma facilidade de fabricação, alta absorção dos esforços de compressão, endurece em temperatura ambiente, até mesmo submerso em água, possuindo tempo de vida útil indeterminado, a depender de diversos fatores como adensamento, cura, cobrimento das armaduras e dos materiais utilizados para a sua fabricação, não podendo se esquecer do meio ambiente em que está, em virtude da classe de agressividade local. Devido a sua alta difusão no meio da construção civil, o concreto passa constantemente por novos estudos no meio técnico científico, de modo a aprimorar as suas características e o seu emprego.

Embora o concreto demonstre uma excelente capacidade de resistir a esforços de compressão, suas propriedades são mais limitadas quando se trata de resistência à tração em regiões específicas, fazendo com que essas regiões, necessitam de um reforço adicional na sua matriz. Por exemplo, as barras de aço, amplamente utilizadas. Nessa conjunção de reforço, ao longo dos anos vários outros materiais apresentam um bom desempenho associado ao concreto, melhorando a resistência a tração do material. Para suprir essa necessidade de resistência a

tração, vários mecanismos de reforço podem ser utilizados, como por exemplo, o emprego de fibras.

Dentre os mecanismos de reforço, salienta-se o uso de fibras, dentre elas, destaca-se o emprego das fibras de aço, vidro, polipropileno, carbono, amianto, celulose, acrílico, polietileno e fibras naturais (Soares, *et al.*, 1994).

No que diz respeito as fibras, além do destaque das fibras de aço e carbono, destacam-se as fibras de polipropileno, elas foram concebidas para se obter um reforço estrutural, nos mesmos moldes que uma fibra de aço, conforme comenta Figueiredo (2011). Além disso, as fibras de polipropileno, quando combinadas na matriz do concreto, propicia simultaneamente ao concreto o controle de fissuração nas primeiras idades e o reforço no estado endurecido, o que torna o material amplamente estudado no meio científico.

Nesse contexto, a presente pesquisa aborda um estudo experimental, através de ensaios de vigas de concreto reforçado com fibras de polipropileno (V-CRFP), com o objetivo de analisar a performance de desempenho do concreto com fibras em diferentes taxas, verificando a viabilidade do uso de fibras de polipropileno na contribuição da resistência à tração do concreto a partir da análise de resistência à tração de vigas no ensaio de quatro pontos.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.2 Geral

A presente pesquisa almeja contribuir ao estudo do concreto reforçado com fibras de polipropileno, discutindo, a partir de uma investigação experimental, a influência das fibras no reforço à flexão de vigas em concreto. A proposta, visou investigar através de uma análise experimental o comportamento de vigas de concreto reforçadas com fibras de polipropileno (CRFP). Nessa abordagem, foram realizados ensaios mecânicos de vigas em quatro pontos, para obtenção da máxima resistência à tração do concreto. As propriedades das vigas são apresentadas no programa experimental mais à frente.

### 1.1.3 Específicos

- Confeccionar 12 vigas de concreto reforçado com fibras de polipropileno de dimensões 150x150x600mm, sendo 03 espécimes de referência a 0% de fibras, 03 espécimes a 0,35% de fibras, 03 espécimes a 0,45% de fibras e 03 espécimes a 0,55% de fibras. Todas em relação ao volume de concreto;

- Analisar o comportamento das vigas em relação a carga x deslocamento ( $P - \delta$ ) a partir do ensaio de quatro pontos;
- Analisar a contribuição da fibra de polipropileno como reforço estrutural;
- Analisar o melhor teor de fibras em relação ao volume de concreto;
- Analisar o comportamento mecânico.

## 1.2. Justificativa

A importância do estudo sobre adição de fibras no concreto se institui em viabilizar inúmeros benefícios, dentre eles, melhorar as propriedades de resistência à tração do concreto, pois, apresenta baixa fragilidade, cerca de  $\approx 10\%$  da sua resistência a compressão, além disso, buscar por soluções para suprir a necessidade de melhorar as propriedades de resistência à tração do concreto, apresenta-se como grande potencial no estudo de compósitos. Dentre os destaques temos em melhorar suas propriedades de resistência aos impactos, fadiga, ductilidade, tenacidade, aumentando assim a sua resistência a fissuração por retração, somado a sua durabilidade. Esse comportamento é potencializado em regiões onde a incidência de raios solares é intensa na região norte do país. O estudo do concreto reforçado com fibras (CRF) também está ligado a busca por soluções mais dinâmicas no setor da construção civil, principalmente nos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares), que são elementos que sofrem diversas ações simultâneas de carregamentos em uma edificação. Nesse sentido, a pesquisa buscou através de um estudo experimental, analisar como alternativa de reforço estrutural a partir da incorporação de fibras de polipropileno na matriz do concreto, a viabilidade e melhoria no comportamento à tração através de um estudo de vigas de concreto reforçado com fibras de polipropileno – CRFP, contribuindo no estudo de concreto com fibras a toda comunidade técnica/científica e ao meio da construção civil.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Concreto com fibras – Propriedade

Segundo Callister e Rethwisch (2020) o compósito é um material formado a partir da combinação de pelo menos dois componentes (material multifásico = matriz + reforço) com propriedades físicas, químicas e mecânicas distintas, que após a sua combinação apresenta comportamento diferenciado, comparativamente aos materiais que lhe deram origem. Atualmente, observa-se que o conceito de compósito pode ser empregado ao concreto armado, pois há a combinação de concreto (material frágil quando tracionado) e armaduras (que aumentam sua resistência à tração e ductilidade).

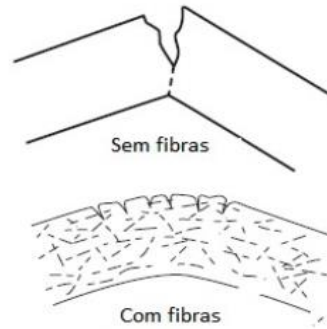
De acordo com Gencel *et al.* (2011) as características mecânicas do concreto podem ser aprimoradas através da adição de fibras curtas, que são aleatoriamente dispersas e orientadas. Essas fibras ajudam a prevenir ou controlar a formação e a propagação de fissuras no material promovendo uma distribuição uniforme das tensões no concreto, principalmente no início do processo de fissuração, mudando o seu comportamento e resultando mais eficiência nas suas propriedades à tração.

Além das condições acima, o concreto reforçado com fibras - CRF tem como característica o acréscimo de resistência residual à tração pós-fissuração, devido ao mecanismo de reforço das fibras que servem de ponte de transferência de tensões através das fissuras (Di Prisco, Plizzar e Vandewalle, 2009). Em adição, melhora o seu desempenho estrutural. A estratégia de adicionar fibras pode ajudar a superar os problemas vários fenômenos que ocorrer nos elementos estruturais, um deles de grande incidência é a fissuração por retração.

Em relação às propriedades mecânicas das fibras, tem-se como destaque, as fibras poliméricas, que são denotadas por possuírem ductilidade variável, moderada resistência à tração e baixo módulo de elasticidade. Bentur e Mindess (2007), afirmam que a presença de fibras na argamassa promove ao concreto um ganho de resistência à tração, maior capacidade de deformação, aumentando a sua tenacidade, conforme pode ser observado na Figura 1, somado a isso, Choi e Yuan (2005) adicionam benefícios como o aumento da resistência ao impacto, resistência à flexão e do módulo de ruptura.

Ainda segundo Bentur e Mindess (2007), comenta que a adição de fibras ao concreto tem pouco ou nenhum efeito sobre a resistência a compressão e no módulo de elasticidade, sendo a sua maior eficiência nas propriedades de tração, quando adicionadas.

Figura 1 - Mecanismo de aumento de tenacidade à flexão do concreto com fibra.



Fonte: Adaptado Mehta e Monteiro, 2008.

O concreto reforçado com fibras se comporta sob solicitações de flexão como um material dúctil, com alta capacidade no desempenho em situações de deflexão, com elevada capacidade de se deformar, concomitante a abertura de finas fissuras, permitindo que o mesmo opere numa condição multifissurado. A ductilidade deste material provém da geração de microfissuras que se comportam de forma contida até que se atinja o limite de deformação do material. Estas propriedades garantem larga utilização em situações em que a carga atuante principal promove deformações (Silva *et al.*, 2019).

Dessa forma, além das vantagens técnicas há vantagens econômicas relacionadas, principalmente, à redução de etapas do processo produtivo e de mão de obra, garantindo maior velocidade e produtividade ao processo (Figueiredo, 2011).

## 2.2 Fibra de polipropileno

No contexto do reforço de materiais à base de cimento, Lucena (2017) frisa que o uso de fibras sintéticas, particularmente as de natureza polimérica, tem adquirido crescente importância nos últimos anos. Destaca-se especialmente o emprego das fibras de polipropileno, que são amplamente empregadas na construção civil.

Conforme comenta Carvalho (2016), as fibras de polipropileno podem ser categorizadas em dois tipos principais: microfibras e macrofibras, como mostra a Figura 2, ambas compostas de polipropileno. Embora as microfibras não desempenhem uma função estrutural, sua atuação reside na minimização da retração plástica do concreto durante os estágios iniciais,

especificamente durante o processo de cura do concreto. Por outro lado, as macrofibras são integradas como componentes estruturais que trabalham juntamente com o concreto.

Figura 2 - Tipos de fibras de polipropileno.



a) Microfibras  
Fonte: Figueiredo, 2005.



b) Macrofibras  
Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

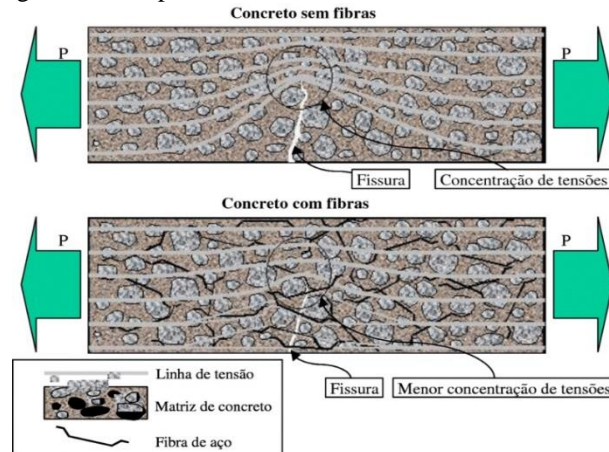
De acordo com Figueiredo (2011), as macrofibras foram projetadas para proporcionar ao concreto uma resistência superior ao impacto e à fadiga do concreto convencional, garantindo um controle eficaz durante o processo de fissuração. Elas apresentam características não corrosivas, nem magnéticas, e são totalmente resistentes aos álcalis presentes no concreto, tornando-as um material adequado para substituir por exemplo as fibras de aço e malhas soldadas, que são amplamente utilizadas no meio.

Quanto ao material, o polipropileno é um material polimérico sintético derivado do propileno e possui uma massa específica baixa, a menor entre os termoplásticos, e uma boa resistência à corrosão (Isaia, 2007). Além disso, este polímero é altamente versátil, sendo amplamente utilizado na fabricação de recipientes plásticos, estofados e até mesmo roupas, sendo notável por sua reciclabilidade. Devido ao seu baixo peso específico, os produtos nos quais é empregado tornam-se leves e acessíveis. Nesse contexto, um alto teor de fibras de polipropileno aplicado ao concreto resulta na redução do peso total do material, quando comparado aos outros tipos de reforço. Isso contrasta com o efeito das fibras de aço, onde sua inclusão no concreto tende a aumentar o peso do elemento estrutural.

Como salienta Figueiredo (2000), as fibras desempenham um papel crucial no controle da propagação de fissuras não concretas, trabalhando como uma ponte para transferência de tensão a partir do início das primeiras fissuras. Isso resulta na minimização da concentração de tensão nas extremidades das fissuras, esse processo pode ser visto na Figura 3. Como pode ser

observado, ocorre uma redução na velocidade de propagação das fissuras no concreto, tornando o material mais dúctil e capaz de resistir às tensões aplicadas após à fissuração.

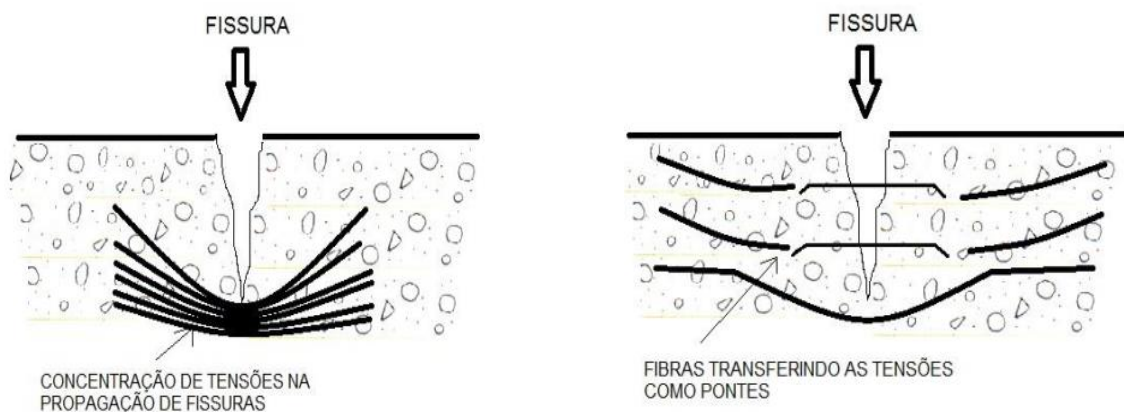
Figura 3 - Comportamento das fibras na matriz do concreto.



Fonte: Figueiredo, 2005.

Araújo (2023) ressalta que durante a propagação das fissuras, os esforços de retração se destacam especialmente no endurecimento da matriz cimentícia, resulta frequentemente na fissuração perceptível do concreto, conforme observado na Figura 4. Essas fissuras são facilmente visíveis e representam danos significativos. No entanto, com a introdução de fibras na matriz, conforme ilustrada na Figura 4 b ocorre distribuição das tensões de forma mais eficiente, evitando assim a formação de fissuras maiores causando o efeito “costura”, principalmente reduzindo a propagação acelerada das fissuras. Esse fenômeno ocorre porque o volume de retração é equilibrado pela formação de microfissuras, que não comprometem significativamente a resistência do concreto. Pelo contrário, estas podem até promover a auto selagem, melhorando a estética da superfície do concreto.

Figura 4 - Concentração de tensões e transferência de tensões em concreto com e sem fibras.



a) Concentração de tensões na tração.

b) Transferência das tensões nas áreas de fissuração.

Fonte: Nunes e Agopyan, 1998.

## 2.3 Recomendações e normativas para CRF

As várias aplicações e usos do CRF exigem metodologias de testes apropriados em suas aplicações. De modo que, seu intuito específico seja verificado de maneira eficiente, com segurança e qualidade, assim como, assegurar o desempenho satisfatório ao longo de sua vida útil.

Normalmente, as metodologias são padronizadas internacionalmente pelas normas europeias (EN) e pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM). No Brasil recentemente padronizado pelas Normas NBR 16940 (ABNT, 2021): Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão. Método de ensaio; NBR 16942 (ABNT, 2021): Fibras poliméricas para concreto – Requisitos e métodos de ensaio; NBR 16938 (ABNT, 2021): Concreto reforçado com fibras – Controle de qualidade, e Norma Mercosul (NM 55, 1996): Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos.

A seguir, são apresentadas as especificações normativas Brasileira que serviu como base para análise deste estudo.

### 2.3.1 NBR 16940 (ABNT, 2010): Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão – Método de ensaio.

Esta Norma estabelece o método de ensaio para avaliação do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras na flexão, com a determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais).

A norma estabelece alguns termos e definições:

- limite de proporcionalidade LOP tensão na extremidade superior do entalhe, calculada a partir de uma carga máxima aplicada no meio do vão, para um valor de CMOD, contido no intervalo de 0 a 0,05 mm, assumida em uma seção não fissurada (FL);
- medida da abertura do entalhe CMOD medida linear da abertura do entalhe na face inferior do corpo de prova;
- resistência residual à tração na flexão tensão na extremidade superior do entalhe, calculada a partir de uma carga aplicada no meio do vão, para o valor de CMOD contido no intervalo de 0,05 mm e 4 mm (FR).

A máquina de ensaio à tração na flexão deve atender aos valores máximos admissíveis determinados pela ABNT NBR ISO 7500-1 para classe 1 ou melhor. Contudo, esta deve operar

em circuito fechado de controle da velocidade, controlado por meio de uma taxa constante de abertura do entalhe ou deslocamento vertical do corpo de prova ( $\delta$ ). O equipamento de ensaio deve ainda ter rigidez e capacidade de resposta suficientes para evitar zonas de instabilidade na curva carga CMOD ou carga deslocamento ( $\delta$ ).

Nesse método de ensaio podem ser adotadas duas configurações de controle: por meio da medida da abertura do entalhe ou por meio da medida do deslocamento vertical do corpo de prova ( $\delta$ ). Para os corpos de prova com altura de 100 mm, apenas a configuração de controle por meio da medida da abertura do entalhe deve ser adotada.

Se o equipamento de ensaio controlar a taxa de aumento do deslocamento vertical do corpo de prova, este procedimento de ensaio deve ser aplicado, desde que os parâmetros relacionados com CMOD sejam transformados em parâmetros de deslocamento vertical.

Se, durante a realização do ensaio, a fissura iniciar fora do entalhe, em ambos os lados, o corpo de prova deve ser descartado.

2.3.2 NBR 12142 (ABNT, 2010): Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.

Essa norma estabelece o método de tração por flexão de corpos de prova de concreto, empregando o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão. As diretrizes estabelecidas nesta norma para o ensaio de corpos de prova moldados são igualmente válidas, sempre que aplicáveis, para testemunhos extraídos de concreto de acordo com a NBR 7680 (ABNT, 2015).

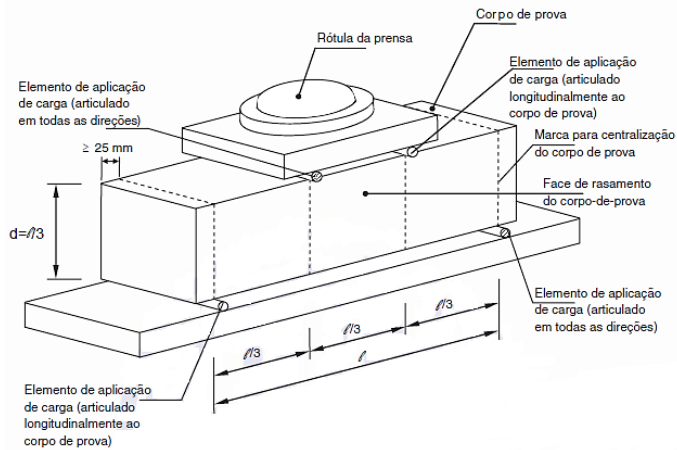
Vale ressaltar, que todas condições para o ensaio, foi seguido as mesmas recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), onde a escala de força escolhida para o ensaio deve ser tal que a ruptura do corpo de prova ocorra no intervalo em que a máquina foi calibrada. Além dessas condições, deve-se observar as seguintes características da máquina de ensaio antes de iniciar:

- a distância entre apoios de aplicação de força deve permanecer constante durante todo o ensaio;
- a força deve ser aplicada normalmente à superfície do corpo de prova, evitando excentricidade ou deslocamento lateral;

- a direção das reações deve ser mantida paralela à direção da força durante todo o ensaio;
- a força deve ser aplicada de forma gradual e uniforme, evitando choques.

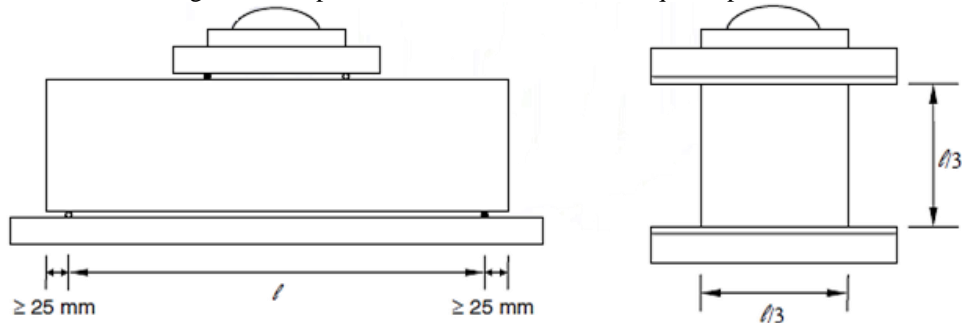
Para a realização do ensaio de quatro pontos, a máquina de ensaio deve ser equipada com um dispositivo de flexão que assegure a aplicação da força perpendicularmente às faces superior e inferior do corpo de prova, sem que ocorra excentricidade. As Figuras 5 e 6 mostram esquematicamente o dispositivo auxiliar para a realização do ensaio a ser acoplado em máquinas que não sejam equipadas para esta finalidade.

Figura 5 - Dispositivo de ensaio (perspectiva).



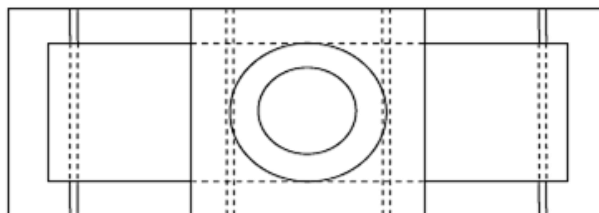
Fonte: ABNT, 2010.

Figura 6 - Dispositivo de ensaio de flexão de quatro pontos.



a) Vista frontal

b) Vista lateral



c) Vista superior

Fonte: ABNT, 2010.

A força deve ser aplicada continuamente e sem choques, de forma que o aumento da tensão sobre o corpo de prova esteja compreendido no intervalo de 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min.

### 2.3.2.1 Procedimentos de Cálculos

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

$$f_{ct,t} = F \cdot l / b \cdot d^2 \quad \text{Eq. 1}$$

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5% de  $l$  (ver Figura 7), calcular a resistência à tração na flexão pela expressão:

$$f_{ct,t} = 3 \cdot F \cdot a / b \cdot d^2 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$f_{ct,t}$  é a resistência à tração na flexão, expressa em megapascals (MPa);

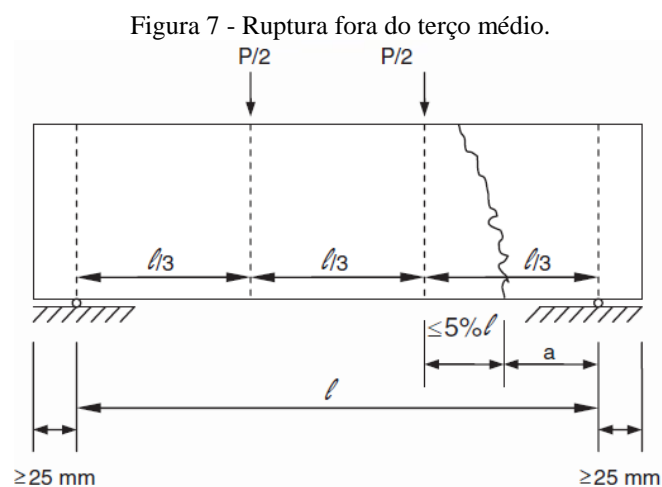
$F$  é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);

$l$  é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);

$b$  é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

$d$  é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

$a$  é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em milímetros (mm).



Fonte: Fonte: ABNT, 2010.

### 3. ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE OUTROS PESQUISADORES

Esta seção discute de forma sucinta algumas pesquisas já realizadas experimentalmente por alguns autores que nortearam este estudo. Optou-se apenas por demonstrar algumas pesquisas relevantes sobre o concreto reforçado com fibras e suas descobertas. De forma que a seção não ficasse extensa selecionou estudos recente sobre a temática que contribuíram para realização dessa pesquisa.

#### 3.1 Silva *et al.*, 2019.

O estudo investigou os resultados de testes de flexão em amostras de vigas de concreto simples e com fibras de polipropileno, utilizando misturas com resistência à compressão, variando de 40 MPa e 20 MPa. Os resultados indicaram que a adição de fibras reduziu a fragilidade do concreto, mesmo em misturas com menor resistência à compressão, proporcionando maior resistência à tração e melhor desempenho sob cargas combinadas. Tendo como destaque a importância da ductilidade do concreto na resistência estrutural. Neste estudo, o autor sugere que uma solução para as limitações do concreto é adicionar fibras de polipropileno, o que aumentou sua ductilidade, ver Figura 8, onde demonstra os estágios da viga até seu rompimento total.

Figura 8 - Corpos de prova em detalhe com fissuras até seu rompimento.



Fonte: Silva *et al.*, 2019.

#### 3.2 Peres *et al.*, 2011.

Nessa pesquisa o autor apresenta uma comparação entre concretos reforçados com fibras estruturais de aço e polipropileno. Os autores informam que as fibras de aço utilizadas possuem alta capacidade de carga e módulo de elasticidade, porém são suscetíveis à corrosão e mais caras economicamente. Em contrapartida, os autores destacam as fibras de polipropileno são mais leves e econômicas.

O estudo avaliou se é possível obter desempenho equivalente com diferentes dosagens de cada tipo de fibra. Os ensaios de flexão foram realizados em amostras de concreto com dosagens de 15, 25 e 35 kg/m<sup>3</sup> para fibras de aço, e 3, 4.5 e 6 kg/m<sup>3</sup> para fibras de polipropileno. Os resultados mostraram que ambos os tipos de fibras aumentam substancialmente a tenacidade do concreto, mas não retardam significativamente a formação das primeiras fissuras, como mostra a Tabela 1 com os parâmetros de resistência à tração na flexão. Quanto as fibras de aço, demonstraram maior eficiência na absorção de energia após a fissuração, com aumento médio de tenacidade de 54% para algumas dosagens utilizadas.

Tabela 1 - Determinação dos parâmetros de resistência à tração na flexão para os consumos de 3, 4.5, e 6 kg/m<sup>3</sup> de fibra de polipropileno e 15, 25, e 35 kg/m<sup>3</sup> de fibra de aço.

Valores Médios	Consumo de fibra (kg/m <sup>3</sup> )	resistência à Tração na flexão - fct (Mpa)	Tenacidade - Tb (N.mm)	Fator de Tenacidade - FT (Mpa)	Coefficiente de Ductilidade - RE, 3%
		3,0	3,49	28143,13	1,25
	4,5	3,53	33694,80	1,50	42,60
	6,0	3,72	39820,83	1,77	47,90
	15	3,72	35763,67	1,59	42,60
	25	3,35	39528,37	1,75	52,4
	35	3,59	67952,07	3,02	84,10

Fonte: Peres *et al.*, 2011.

### 3.3 Santos *et al.*, 2020.

O estudo experimental compara os resultados de ensaios de flexão a quatro pontos em vigas de concreto com e sem adição de fibras de aço. O objetivo principal foi analisar como as fibras de aço influenciam o surgimento de patologias relacionadas à fissuração do concreto. Este trabalho é justificado pela pouca exploração da implementação de elementos de reforço para flexão no Brasil, apesar do crescimento da técnica nas últimas décadas. Embora vigas com fibras não sejam amplamente utilizadas no país, pisos e lajes reforçados com fibras já são mais comuns. Os ensaios de laboratório envolveram 08 (oito) corpos de prova, alguns com entalhes induzindo fissuras na região central, ver Figuras 9 e 10.

Um baixo teor de fibras de aço (0,25%) foi usado para garantir a trabalhabilidade do concreto em situações típicas da construção civil. Observou-se um aumento de 26,6% na carga máxima atingida com o uso das fibras, demonstrando eficácia na resistência à flexão sem comprometer a trabalhabilidade do concreto, as Tabelas 2 e 3 demonstram os resultados obtidos através do ensaio.

Tabela 2 - Resultados vigas sem fibras de aço.

Viga	Velocidade de Ensaio (Mpa/s)	Carga Máxima (KN)	Deslocamento momento Ruptura (mm)	Local da fissura (cm)
1	1	19,65	.	x = 13
2	0,5	16,55	0,28	x = 25 (Entalhe)
3	0,5	14,85	0,32	x = 25 (Entalhe)
4	0,5	17,25	0,23	x = 25 (Entalhe)
	Média	17,07	0,276	

Fonte: Santos *et al.*, 2020.

Tabela 3 - Resultado vigas com fibras de aço.

Viga	Velocidade de Ensaio (Mpa/s)	Carga Máxima (KN)	tempo de Ensaio (s)	Deslocamento momento Ruptura (mm)	Local da Fissura (cm)
5	1	26,5	182,47	.	x = 30,5
6	0,5	20,75	297,2	0,45	x = 25 (Entalhe)
7	0,5	17,55	248,71	0,68	x = 25 (Entalhe)
8	0,5	21,7	244,55	0,77	x = 25 (Entalhe)
	Média	21,62	243,23	0,63	

Fonte: Santos *et al.*, 2020.

Figura 9 - Trajetória das fissuras no concreto sem fibras.

Fonte: Santos *et al.*, 2020.

Figura 10- Trajetória das fissuras no concreto com fibras.

Fonte: Santos *et al.*, 2020.

### 3.4 Cunha, W. A., 2022.

No programa experimental realizado, foram produzidas 15 séries de estudo. Uma série de referência não teve adição de microfibras de polipropileno para cada relação água/cimento (a/c) estudada, totalizando 3 séries. Além disso, outras 12 séries foram produzidas com adições de 0,6% e 1,0% de microfibras de polipropileno, variando o comprimento das fibras entre 12 mm e 25 mm, ver propriedades na Tabela 4, com as relações a/c sendo 0,45; 0,55 e 0,65.

Foram conduzidos ensaios no estado fresco do concreto para avaliar consistência e trabalhabilidade, e no estado endurecido para avaliar resistência à compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade aos 7 e 28 dias, observado na Figuras 11. Os resultados foram analisados utilizando análise de variância (ANOVA) e teste Tukey para determinar a significância estatística das respostas. Concluiu-se que a adição ótima de microfibras de polipropileno ao concreto foi de 1,0% com fibras de comprimento de 12 mm e relação a/c de 0,55.

Tabela 4 - Propriedades físicas das microfibras de polipropileno.

Propriedades físicas					
Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Seção	Comprimento Alongamento		Matéria-prima	Peso Específico ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
		(mm)	(%)		
20	Circular	12	28	Polipropileno	0,9
20	Circular	25	28	Polipropileno	0,9

Fonte: Cunha, W. A., 2022.

Figura 11 - Ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: Cunha, W. A., 2022.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A metodologia do trabalho foi fundamentada em um programa experimental, o estudo investigou o comportamento de doze (12) vigas em concreto reforçado com fibras de polipropileno - CRFP na matriz do concreto. Nesse contexto, a condição de contorno das vigas foi do tipo biapoiado e o carregamento ocorreu através do ensaio de quatro pontos, onde retratou a tração na flexão direta das vigas, seguindo as recomendações da NBR 12142 (ABNT, 2010).

Além do sistema de ensaio das vigas, essa seção também discutirá a metodologia pertinente à caracterização dos materiais (concreto e fibras). Comunica-se que todas as atividades dessa abordagem experimental foram realizadas no laboratório de engenharia civil do Campus Universitário de Itaituba e os ensaios mecânicos no laboratório de tecnologia da madeira do Instituto de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Santarém, assim como no Laboratório de materiais de construção da empresa ACARÍ.

### 4.1 Características das vigas de CRFP

Nessa pesquisa, doze (12) vigas de concreto reforçado com fibras de polipropileno (CRFP) com diferentes teores de fibras foram analisadas. A seção transversal foi a mesma para todas as vigas, com resta  $a = 150 \text{ mm}$ , e seu comprimento  $L$  de  $600 \text{ mm}$ , logo, nessas condições, as vigas foram agrupadas em quatro grupos, Ref 0% de fibras (Ref = Referência), 0,35%, 0,45% e 0,55% de fibras, em função do volume de concreto (ver Tabela 5). Essas propostas de volumes, teve como objetivo de verificar o melhor desempenho do teor de fibras na matriz do concreto.

Comenta-se que a escolha das porcentagens de volumes, foi em função de recomendações do fabricante, variando de  $\approx 2,5$  a  $6 \text{ kg por m}^3$  de concreto, além de outros estudos realizados por alguns pesquisadores através de publicações científicas que mostraram o desempenho das adições de fibras entre as porcentagens abordadas nesse estudo, resultou na maior performance no comportamento mecânico dos elementos estruturais estudados, porcentagem abaixo ou muito superior aos valores proposto nesse estudo, causaram problemas de homogeneidade e trabalhabilidade do material, o que comprometia a resistência mecânica no decorrer dos ensaios.

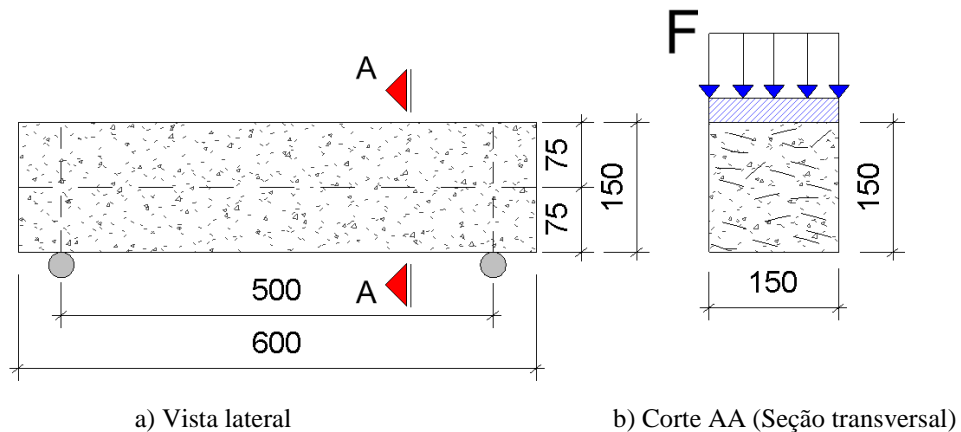
Tabela 5 - Relação de amostras de vigas.

CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS ESTUDADAS					
Amostras		$a$ (mm)	$b$ (mm)	$L$ (mm)	Vol/Fib (%)
GR I	V1- REF	150	150	600	0
	V2- REF				
	V3- REF				
GR II	V1 - 0,35	150	150	600	0,35
	V2 - 0,35				
	V3 - 0,35				
GR III	V1 - 0,45	150	150	600	0,45
	V2 - 0,45				
	V3 - 0,45				
GR IV	V1 - 0,55	150	150	600	0,55
	V2 - 0,55				
	V3 - 0,55				

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

A classe de resistência estimada para os 28 dias de idade do concreto foi de 30 Mpa ( $f_c$ ). A Figura 12 mostra as características geométricas da seção da viga.

Figura 12 - Características geométricas das vigas (Unidades em milímetros).

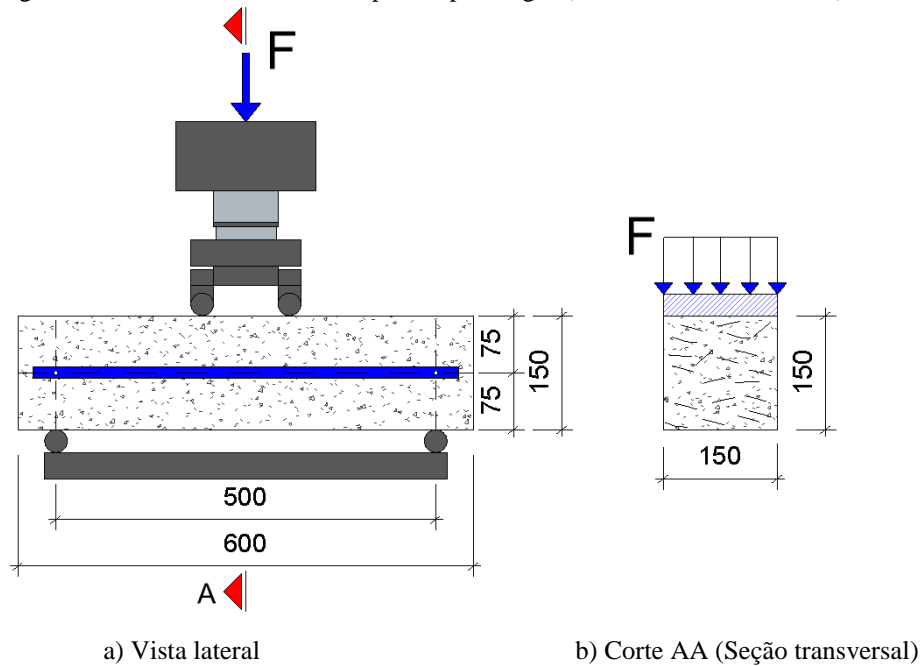


Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

## 4.2 Sistema de Ensaio

O arranjo desse sistema pretendeu reproduzir as condições de contorno e carregamento apresentado na Figura 13. Nesse cenário, apoios simples (biapoiado) configuram o contorno, onde promoveu a tração na flexão direta nas vigas para a condição de carregamento de acordo com as recomendações da NBR 12142 (ABNT, 2010).

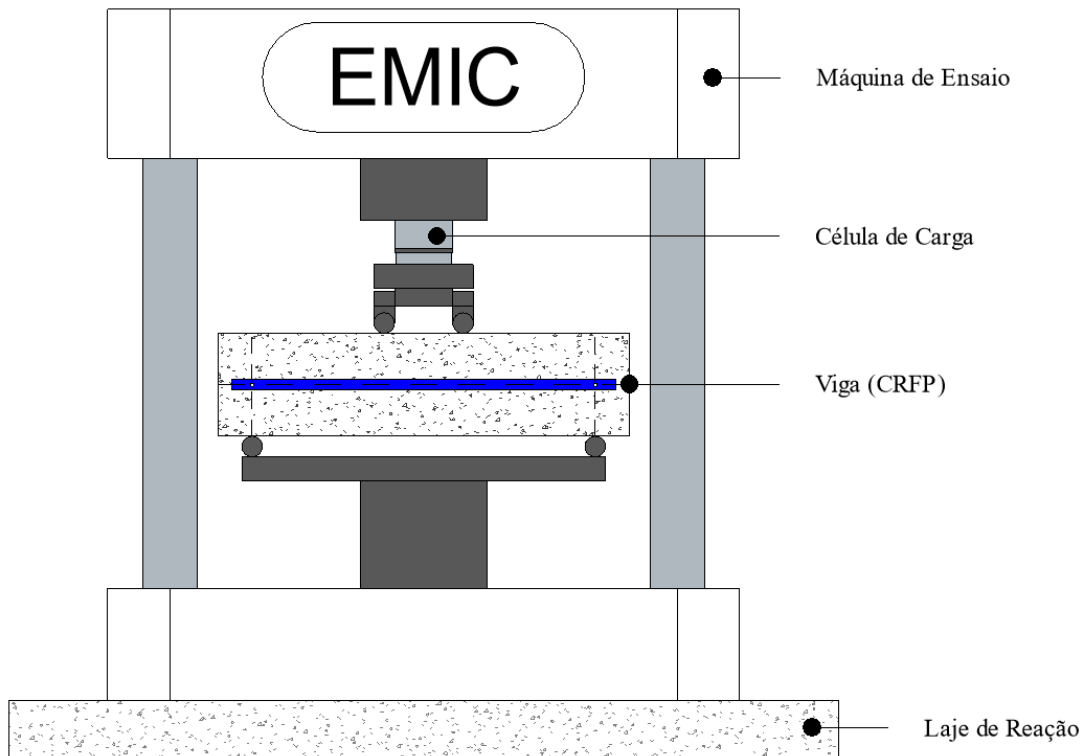
Figura 13 - Sistema de ensaio de 4 pontos para vigas (Unidades em milímetros).



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

O sistema de ensaio completo utilizado é mostrado na Figura 14. A aplicação da carga se deu a partir do cilindro hidráulico acoplado a máquina universal da marca EMIC, com capacidade de 2000 kN.

Figura 14 - Montagem do Sistema de ensaio de 4 pontos para vigas.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

O monitoramento das cargas foi realizado por uma célula de carga, com precisão de 0,1 kN e capacidade de 2000 kN, registrando a partir do software próprio do equipamento. Ressalta-se, que foi previamente calibrado o equipamento para que retratasse fielmente e com alta precisão a aplicação constante do carregamento para obtenção dos esforços.

#### 4.2.1 Índice de ductilidade

Conforme Nzambi, *et al.* (2023), a ductilidade é uma medida de habilidade de deformações inelásticas que um material ou um elemento estrutural pode sofrer sem que ocorra perda substancial de sua capacidade de resistência, ou seja, no que diz respeito à capacidade de redistribuição de esforços pós-fissuração, por exemplo. Assim, o índice de ductilidade, ID, representa o estado global da deformabilidade, de acordo com a Equação 3. Nas estruturas de concreto reforçado com fibras, por exemplo, aumentam sua capacidade de resistência proporcionalmente ao aumento da ductilidade, devido ao efeito de ponte, que ativa as fibras no estágio pós-fissuração.

$$ID = \delta_u / \delta_y \quad \text{Eq. 3}$$

Em que  $\delta_y$  e  $\delta_u$  são os deslocamentos obtidos nos momentos de escoamento e de ruptura da estrutura respectivamente.

### 4.3 Caracterização dos materiais

#### 4.3.1 Dosagem

Os procedimentos a seguir foram realizados com o intuito de facilitar a caracterização dos materiais no processo de dosagem. Inicialmente foi realizado a caracterização dos materiais e preparação para a moldagem dos corpos de prova (CP's) e das vigas, como referência, o traço calculado anteriormente foi para a de classe C30, que corresponde a 30 MPa e posterior concretagem das vigas, e por fim os ensaios mecânicos.

O cimento utilizado na fabricação dos corpos de prova para os ensaios e para os espécimes de vigas, foi do tipo Cimento Portland CP II F-32 do fabricante POTY (ver Figura 15), comercializado na cidade de Itaituba-PA.

Figura 15 - Caracterização do Cimento Portland CII F 32.



a) Tipo de Cimento

b) separação e pesagem

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

No que diz respeito ao agregado miúdo (areia), foi realizado o ensaio de classificação granulométrica para obtenção da massa unitária e massa específica conforme recomendação da NBR 52 (NM, 2009), onde foi classificada como areia média. Após sua classificação, o montante da areia foi submetido ao processo de secagem, de forma natural, ao sol, ver Figura 16 c. A escolha do processo de secagem e caracterização adotada na pesquisa, se deu por retratar o máximo fiel possível da realidade encontrada nos canteiros de obras.

Figura 16 - Processo de secagem do agregado miúdo.



a) Ensaio granulometria

b) separação e pesagem

c) secagem *in natura*

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Para o agregado graúdo (brita), foi utilizada a brita nº0 da própria região do município de Itaituba/PA. Inicialmente foi caracterizada por granulometria (peneiramento), em seguida foi realizada a classificação do agregado entre as peneiras (4,8 a 9,5 mm), lavada e submetida ao processo de secagem natural, ao sol. Conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 - Processo caracterização e de secagem do agregado graúdo.



a) separação e pesagem

b) Classificação granulométrica

c) secagem *in natura*

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

O resumo dos materiais constituintes utilizados na preparação dos concretos desse estudo, assim como o seu consumo, é mostrado na Tabela 6. Ressalta-se que foram seguidas as recomendações do método de dosagem IPT. Além disso, informa-se que todas as dosagens de concretos apresentaram trabalhabilidade aceitável, segundo as recomendações da NBR 67 (NM, 1988).

Tabela 6 - Consumo de materiais para a fabricação do concreto.

Concreto	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )					
	Cimento <sup>a</sup>	Areia <sup>b</sup>	Brita <sup>c</sup>	Água	Fibra	Aditivo
<i>Viga - Referencia</i>	366,49	697,09	1021,87	212,56	0%	-
<i>Viga - 0,35%</i>	366,49	697,09	1021,87	212,56	0,35%	-
<i>Viga - 0,45%</i>	366,49	697,09	1021,87	212,56	0,45%	-
<i>Viga - 0,55%</i>	366,49	697,09	1021,87	212,56	0,55%	-

<sup>a</sup> Cimento Portland CPII F 32;<sup>b</sup> Areia média: massa unitária = 1,58 kg/dm<sup>3</sup> e massa específica = 2,65 kg/dm<sup>3</sup> (NBR MN 52, 2009);<sup>c</sup> Brita 0: Diâmetro máximo = 9,5 mm (NBR MN 248, 2003).

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Os ensaios registraram, de um modo geral, assentamentos de  $\approx 40 \pm 10$  mm, (ver Figura 18).

Figura 18 - Consistência e trabalhabilidade (Slump test do Concreto).



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

#### 4.3.2 Concreto

Após a caracterização dos materiais para a fabricação do concreto, realizou-se a moldagem dos corpos de prova CP's, para o ensaio de compressão axial, conforme recomenda a NBR 5739 (ABNT, 2018). Três corpos de prova CP's cilíndricos, 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, foram moldados nas mesmas condições do concreto utilizado para as vigas, preparado e acondicionado em cura até os 28 dias de idade. A Figura 19, mostra a moldagem os corpos de prova. A partir do ensaio de compressão axial, foi possível obter a confirmação do traço planejado, C30 Mpa ( $f_{ck}$ ).

Figura 19 - Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

#### 4.3.3 Fibras

As fibras de polipropileno utilizadas neste estudo foram do tipo Macrofibra, da marca Macrofibra do Brasil, modelo Duristeel, é uma fibra sintética de alto desempenho especialmente projetada para reforços em concreto. Desenvolvida para melhorar o desempenho estrutural de

elementos estruturais, revestimentos e obras em edificações. Ela é fabricada a partir de multifilamentos poliméricos nobres, o que resulta em um produto de alto valor agregado, com grande durabilidade e resistência. Dessa maneira, a fibra de polipropileno para concreto é capaz de suportar a ação de cargas, bem como variações de temperatura, esforços físicos e a corrosão.

Dentre os seus principais pontos positivos é que atuam auxiliando na resistência a fadiga e impactos, além de tornar o concreto um material mais dúctil. A Figura 20, apresenta o tipo de fibra e sua classificação por pesagem para as amostras.

Figura 20 - Pesagem do teor de fibras de polipropileno.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

As propriedades físicas das fibras são de acordo com ANAPRE CF 001/2011:

Material Polipropileno;

Módulo de elasticidade 9,0 GPa;

Peso específico 0,97 g/cm<sup>3</sup>;

Comprimento 54 mm;

Fator de Forma 54 FF Multifilamento encapsulado, frisada com pós arranjo;

Ancoragem Excelente;

Cor Cinza;

Resistência a tração 850 Mpa;

Resistência alcalinidade ALTA – Conforme ensaio na UFSCar LCP 13118.

Absorção de água zero;

Conformidade NBR 16940 (ABNT, 2021) – Concreto reforçado com fibras: determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistência residuais) – Método de ensaio.

#### 4.3.4 Preparação das vigas com Fibras

Após a fase inicial de caracterização dos materiais, deu-se o início a confecção das vigas. Iniciou pela fabricação das formas, como pode ser visto na Figura 21. O material utilizado para as formas, foi do tipo madeirite com acabamento deslizante do material, de modo a facilitar no processo de desforma.

Figura 21 – Preparação da forma para as vigas.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Antes de iniciar o processo de concretagem das vigas, foram preparadas as superfícies com desmoldantes e identificação das vigas por grupo. Na sequência, foi realizado a fabricação do concreto de forma manual em betoneira (ver Figura 22). Esse processo se repetiu durante 04 (quatro) vezes, variando o volume de fibras conforme planejado, 0%, 0,35%, 0,45% e 0,55% de fibra por m<sup>3</sup> de concreto.

Figura 22 - Preparação do concreto com fibra manual em betoneira.



a) Concreto simples



b) Adição de fibras no concreto

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Foi iniciada primeiramente a fabricação do concreto sem a adição de fibras, de modo a garantir maior homogeneidade do material no processo de mistura, evitando assim, causar ouriços, na sequência foi adicionado as fibras, garantindo maior envolvimento na mistura, (ver Figura 22).

O processo de concretagem das vigas se deu a partir das amostras de referência, 0% de fibras, seguindo a sequência para os grupos II, III e IV, correspondente respectivamente a 0,35, 0,45 e 0,55% de fibras. O adensamento do concreto teve como auxílio o vibrador mecânico de agulha de 32 mm, garantindo assim, maior eficiência na homogeneidade na hora da moldagem das vigas. A Figura 23, mostra o processo da concretagem das vigas.

Figura 23 - Processo de concretagem das vigas.



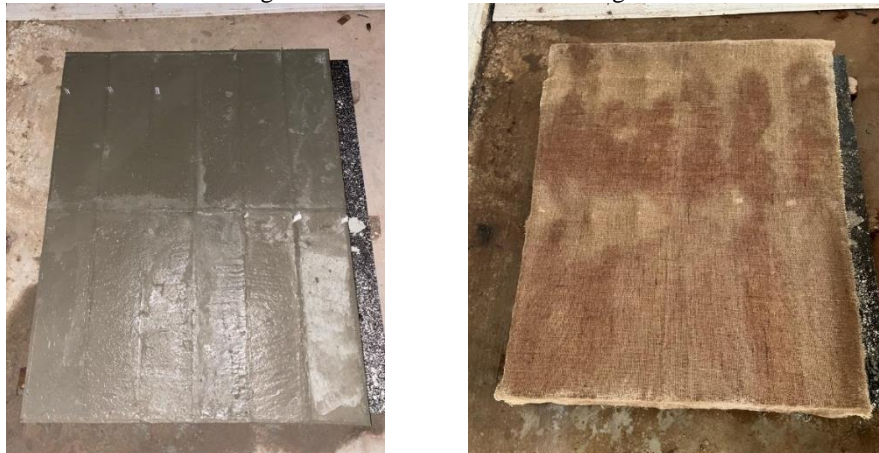
a) Amostra de referência

b) Finalização da concretagem

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Aguardou-se 24 horas após a concretagem das vigas e iniciou-se o processo de cura durante duas (02) semanas, molhando pelo pelos três vezes ao dia, para que as viga não apresentassem fissuras típicas de retração. Foi adicionado uma camada de sacos de farroupilha para garantir maior tempo de umidade nas peças, (ver Figura 24).

Figura 24 - Processo de cura das vigas.



a) Início do processo de cura

b) Adição de camada de Farroupilha

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Passados os 28 dias de idade após a concretagem das vigas e iniciou-se o processo de desformas das vigas, (ver Figura 25).

Figura 25 - Desformas das amostras de vigas.



a) Desforma das vigas



b) Detalhe ampliado das Vigas CRFP

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

## 5 DISCUSSÃO E RESULTADOS

### 5.1 Resistência Mecânica a Compressão

Conforme científico antes, foram realizados os ensaios de tração em quatro (04) pontos conforme mostra a Figura 13, este ensaio permitiu obter a máxima resistência à tração do concreto reforçado com fibras de polipropileno seguindo as recomendações da NBR 12142 (ABNT, 2010). Além disso, o planejamento de referência inicial para a resistência do concreto, considerou-se a classe C30 à compressão. Ressalta-se que, o objetivo desse ensaio de compressão axial foi identificar uma possível variação do traço planejado (C30) e ter como referência, além disso, o ensaio permitiu verificar de falha no processo de dosagem para garantir com qualidade o ensaio de tração direta, que foi o objetivo principal da pesquisa, no qual, teria melhor aproveitamento das fibras ao inserir.

A Figura 26 mostra a realização dos ensaios, os corpos de prova foram submetidos a cargas constantes e após o rompimento utilizou-se da carga máxima aplicada para calcular o valor da tensão de compressão axial (Eq.4), de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

$$F_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \quad (4)$$

Onde:  $F_c$  é a resistência à compressão (MPa);  $F$  é a força máxima alcançada (N) e  $D$  é o diâmetro do corpo de prova (mm).

Figura 26 - Ensaios de compressão axial dos corpos de prova.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

A Tabela 7 mostra os resultados dos ensaios de compressão axial das três (03) amostras de concreto aos 28 dias de idade, tendo como média 30,26 Mpa. Esse resultado mostra que o planejamento do traço e a resistência desejada foi confirmado.

Tabela 7 - – Resultado ensaio de compressão axial.

	Amostra	Idade	Resistência (MPa)	Média (MPa)
<b>Referência</b>			30,02	
	0% de fibra	28 dias	29,55	30,26
			31,2	

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

## 5.2 Resistência Mecânica à tração na flexão

### 5.2.1 Viga de Referência (0% de Fibras).

O sistema de ensaio de quatro (04) pontos foi preparado para realização dos ensaios de tração na flexão, conforme mostra a Figura 27. Após preparação do equipamento, foi realizado a calibração e conferidos as vinculações de apoio das vigas, além da configuração para leitura automática pela célula de carga, de modo a garantir um carregamento constante a 0,02 Mpa/s, garantindo que não ocorresse nenhum distúrbio lateral que pudesse comprometer a leitura do equipamento e os resultados.

Figura 27 - Ensaio de tração na flexão.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Vale ressaltar, que antes do posicionamento das vigas, foram feitas as marcações nas laterais das vigas entre as distancias eixo a eixo do equipamento de apoio. Esse procedimento permitiu um alinhamento preciso para que a flexão máxima ocorresse na região central das vigas, explorando assim a máxima capacidade à tração dos materiais durante os ensaios.

Os ensaios iniciaram pelas vigas de referência, com 0% de fibras na matriz do concreto. Recordar-se que foram ensaiadas três (03) vigas para cada grupo. A Figura 28 mostra a realização dos ensaios do grupo I, e a Tabela 8, apresenta dos resultados dos ensaios.

Figura 28 – Ensaios vigas 0% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Tabela 8 - Resultado ensaio de tração VP 0% de Fibras.

VP 0,0%	Carga (N)	$l$ (mm)	$b$ (mm)	$d$ (mm)	$f_{ct,f}$ (MPa)	$f_{ct,f}$ (MPa) Média
V1	29379,14	450	150	150	3,917	
V2	26389,98	450	150	150	3,519	3,655
V3	26475,39	450	150	150	3,530	

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Os resultados da tensão  $f_{ct,f}$  foram obtidos a partir da Eq.1, pois, a fratura das vigas ocorreram na seção central conforme observa-se na Figura 29. Além disso, é possível perceber que ocorreu uma ruptura brusca e frágil do concreto, o que já era esperado devido à baixa resistência a tração do material  $\approx 10\%$  da resistência à compressão do concreto. Esse comportamento foi comum para as três amostras V1, V2 e V3, sendo o seu resultado médio 3,65 Mpa.

Figura 29 – Ruptura brusca do concreto.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

A qualidade do concreto foi garantida pela mistura durante o processo de dosagem, tendo um excelente envolvimento dos materiais, ver Figura 30.

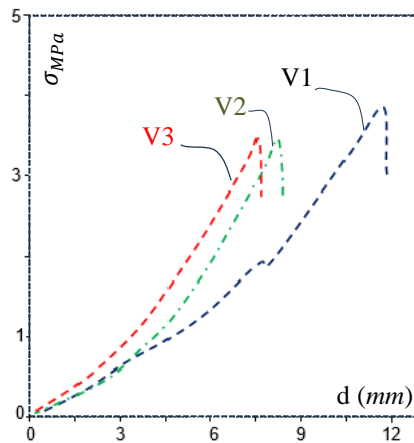
Figura 30 – Qualidade do concreto vigas 0% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

A Figura 31 mostra o comportamento *tensão x deslocamento* ( $\sigma \times d$ ) para as vigas do grupo I. Nessa figura é possível verificar que o comportamento da viga V3 apresentou maior deslocamento entre as demais.

Figura 31 – Tensão x deslocamento ( $\sigma \times d$ ) vigas 0% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

### 5.2.2 Viga (0,35% de Fibras).

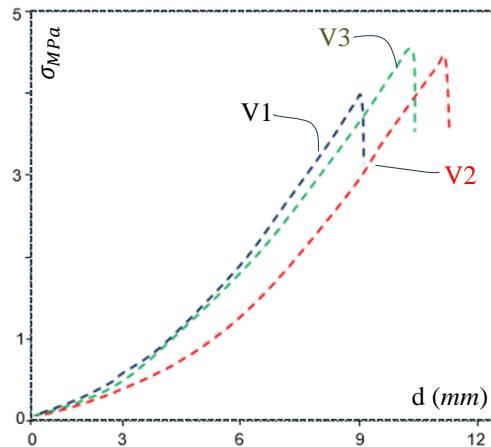
Para o grupo II de vigas a 0,35% de fibras em relação ao volume de concreto, os ensaios seguiram os mesmos procedimentos apresentados na Figura 27, os resultados são apresentados na Tabela 9:

Tabela 9 - Resultado ensaio de tração VP 0,35% de Fibras.

VP 0,35%	Carga (N)	$l$ (mm)	$b$ (mm)	$d$ (mm)	$f_{ct,f}$ (MPa)	$f_{ct,f}$ (MPa) Média
V1	29720,76	450	150	150	3,963	
V2	33051,54	450	150	150	4,407	4,293
V3	33820,18	450	150	150	4,509	

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

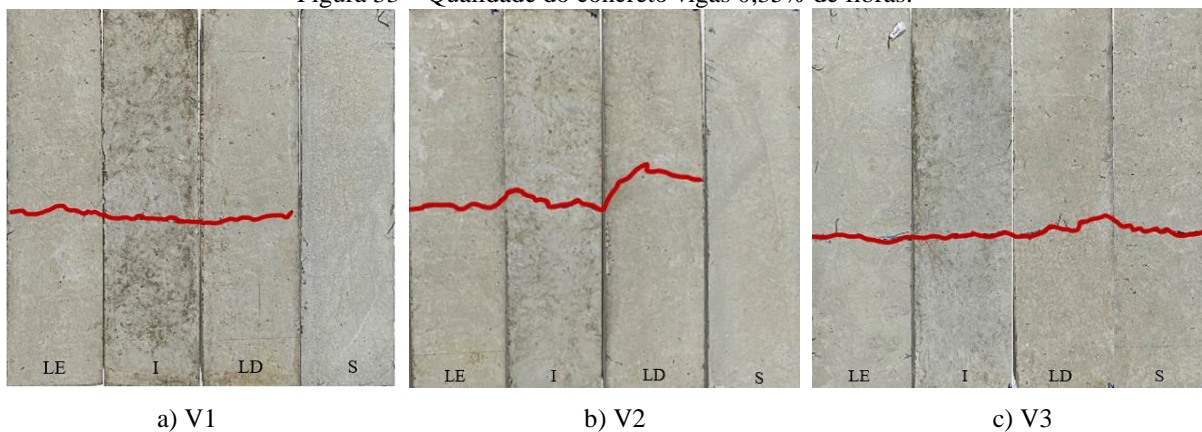
Os resultados para o grupo II quanto a resistência à tração na flexão foi superior ao concreto sem fibras, na ordem de  $\approx 15\%$  superior ao de referência, esse resultado foi muito positivo, pois mostrou que a incorporação das fibras de polipropileno contribuiu com as propriedades do concreto à tração, bem como o aumento da sua tenacidade, esse comportamento pode ser visto no gráfico na Figura 32.

Figura 32 – Tensão x deslocamento ( $\sigma \times d$ ) vigas 0,35% de fibras.

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

A Figura 33 mostra o padrão de fissuração das vigas, nessa figura, LE é lateral esquerda, I é a parte Inferior da viga, LD é a lateral direita e S, é a parte superior da viga.

Figura 33 – Qualidade do concreto vigas 0,35% de fibras.



a) V1

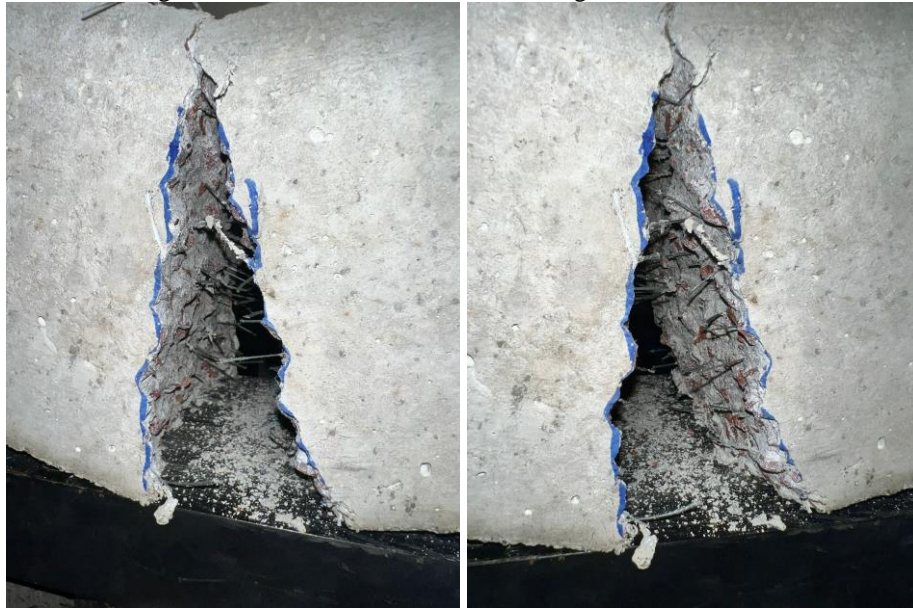
b) V2

c) V3

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

A Figura 33 esclarece a mudança de comportamento das vigas quando se usou as fibras, passando de uma ruptura frágil (0% de fibras) a uma ruptura dúctil (com fibras). A Figura 34, mostra com detalhes a ancoragem das fibras, também é possível perceber que o concreto apresentou alta qualidade e uma boa relação interfacial entre os agregados e o envolvimento das fibras.

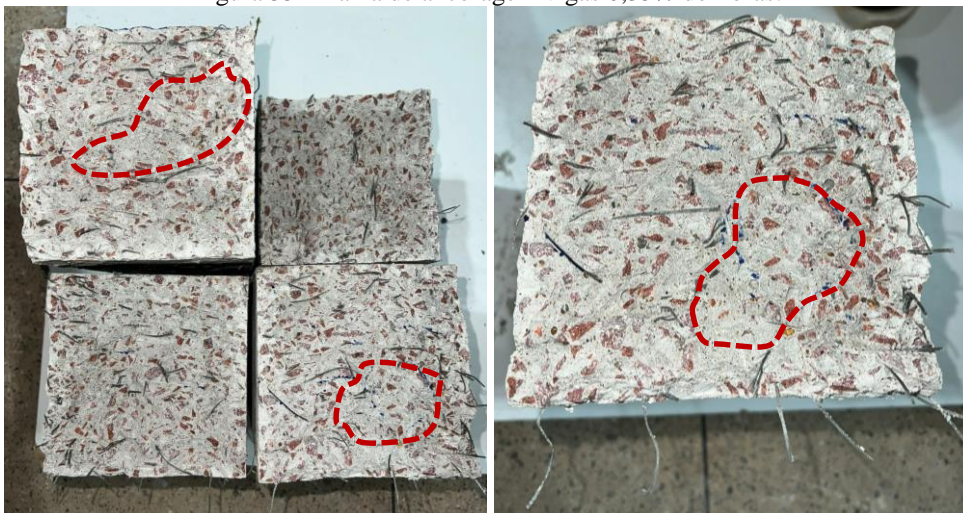
Figura 34 – Detalhamento do concreto vigas 0,35% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

A Figura 35, mostra de outro ângulo a ancoragem das fibras na matriz do concreto, é possível perceber que houve uma excelente aderência ao concreto, no entanto alguns pontos ficaram lacunas, o que pode ter comprometido a contribuição das fibras durante os ensaios.

Figura 35 – Falha de ancoragem vigas 0,35% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

### 5.2.3 Viga (0,45% de Fibras).

Para o grupo III de vigas a 0,45% de fibras, os ensaios seguiram os procedimentos anteriores, os resultados são apresentados na Tabela 10:

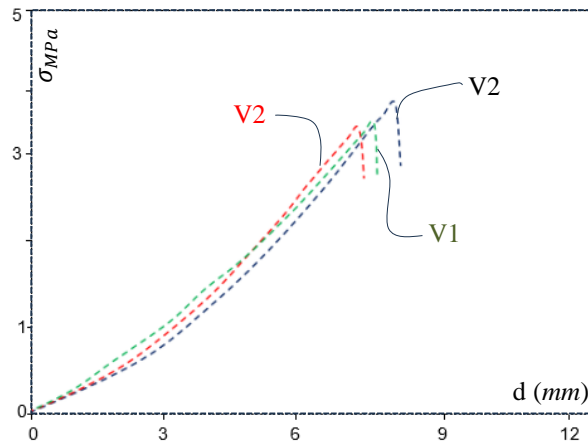
Tabela 10 - Resultado ensaio de tração VP 0,45% de Fibras.

VP 0,45%	Carga (N)	$l$ (mm)	$b$ (mm)	$d$ (mm)	$f_{ct,f}$ (MPa)	$f_{ct,f}$ (MPa) Média
V1	28781,31	450	150	150	3,838	
V2	30916,42	450	150	150	4,122	3,913
V3	28354,29	450	150	150	3,781	

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

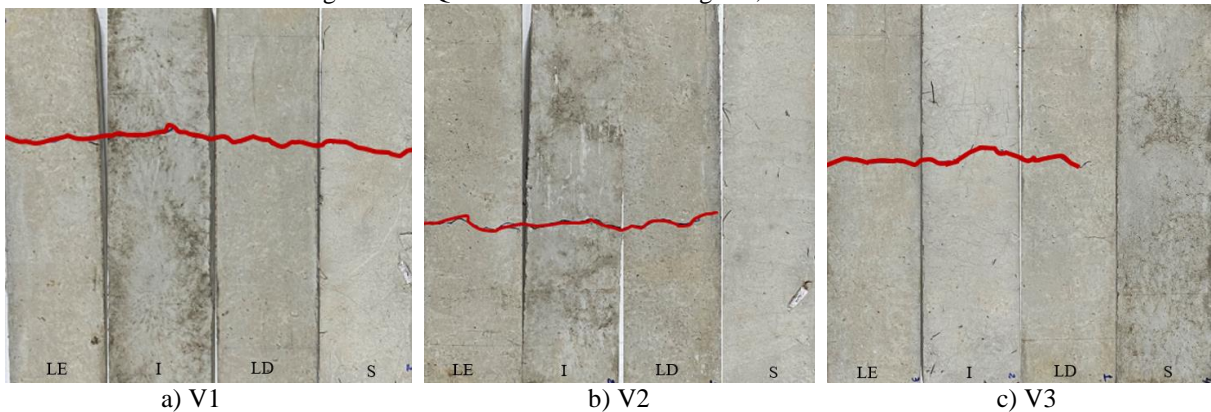
Os resultados para esse grupo foram inferiores ao grupo II a 0,35% de fibras, apesar desse resultado, o comportamento foi mais dúctil como pode ser visto no gráfico da Figura 36, os resultados foram importantes, pois a tenacidade aumentou apresentando baixa deformação. O padrão de fissuração pode ser visto na Figura 37.

Figura 36 – Tensão x deslocamento ( $\sigma \times d$ ) vigas 0,45% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Figura 37 – Qualidade do concreto vigas 0,45% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Figura 38 – Detalhamento da ancoragem das fibras - vigas 0,45% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Na Figura 38 e 39 é possível perceber o rompimento das fibras, garantindo o “efeito costura” com o aparecimento das primeiras fissuras. A Figura 39 mostra que houve uma boa distribuição das fibras.

Figura 39 – Distribuição das fibras a 0,45%.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

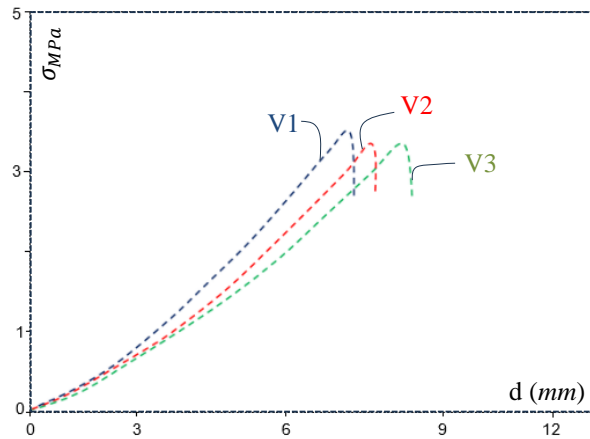
#### 5.2.4 Viga (0,55% de Fibras).

Por fim, o grupo IV de vigas a 0,55% de fibras, os resultados são apresentados na Tabela 11. Os resultados apontaram que o volume a 0,55% de fibras diminuiu resistência, chegando à conclusão que volumes maior que 0,50% de fibras por  $m^3$  de concreto o material não apresenta contribuição com a resistência à tração. Apesar da fragilidade, o benefício se deu na ductilidade durante os ensaios, como pode ser visto no gráfico da Figura 40, isso contribui para que não ocorra uma ruptura frágil, além de garantir boa resistência a impactos por exemplo.

Tabela 11 - Resultado ensaio de tração VP 0,55% de Fibras.

VP 0,55%	Carga (N)	$l$ (mm)	$b$ (mm)	$d$ (mm)	$f_{ct,f}$ (MPa)	$f_{ct,f}$ (MPa) Média
V1	27329,43	450	150	150	3,644	
V2	26304,58	450	150	150	3,507	3,557
V3	26389,98	450	150	150	3,519	

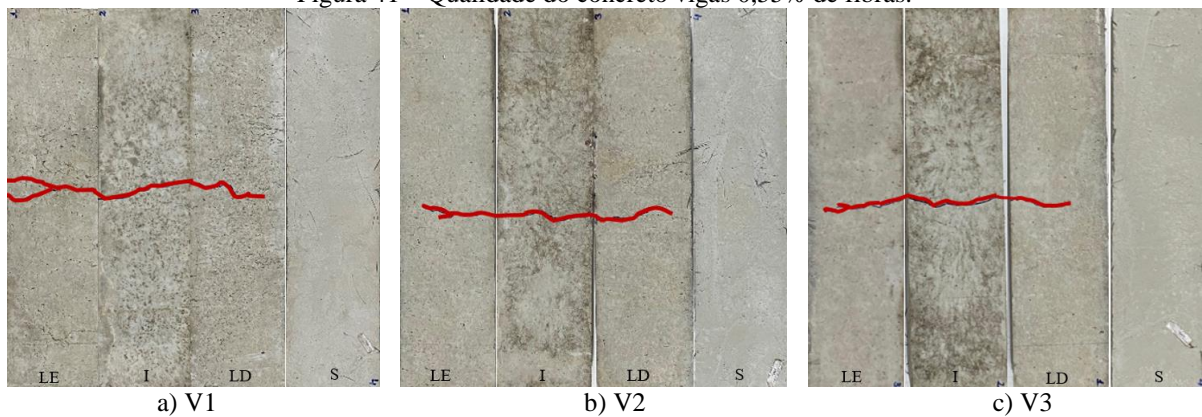
Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

Figura 40 – Tensão x deslocamento ( $\sigma$  x  $d$ ) vigas 0,55% de fibras.

Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

A Figura 41 apresenta o padrão de fissuração das vigas do grupo IV. Observa-se nessa figura que as fissuras não avançaram como nos demais grupos, isso ocorreu devido ao alto volume de fibras garantindo um efeito costura maior, também pode ter ocorrido a presença de “ouriços” quando ocorre uma grande concentração de fibras em pequenas partes da viga por falha no processo de adensamento do concreto.

Figura 41 – Qualidade do concreto vigas 0,55% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2024.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa apresentou e avaliou o desempenho do concreto reforçado com fibras de Polipropileno do tipo Macrofibra através de um estudo experimental. Para este fim, foram ensaiados Vigas Prismáticas (150x150x600 mm) reforçadas com fibras, através de ensaios mecânicos de tração na flexão. Teve como objetivo avaliar o comportamento do concreto quando incorporados diferentes teores fibras e sua eficiência. Para a análise, obteve-se um referencial comparativo do concreto sem fibras, calculou-se as mesmas resistências seguindo as recomendações das normas Brasileiras NBR 5739 (ABNT, 2018) para compressão axial e NBR 12142 (ABNT, 2010) para as resistências à tração na flexão.

A partir dos resultados dos ensaios da resistência à tração, tomando como base os valores de referência (0% de fibras), não houve uma variância acentuada da resistência que pudesse comprometer à resistência do concreto quando adicionado as fibras, garantindo um ganho à tração, em torno de [ $\approx 10\%$  -  $\approx 15\%$ ] da resistência a compressão da classe C30 que foi planejada.

A melhor resistência ocorreu para o volume a 0,35% de fibras/m<sup>3</sup> de concreto, seguido por 0,45% de fibras/m<sup>3</sup>. O volume 0,55% de fibras/m<sup>3</sup> garantiu apenas maior ductilidade, se tornando inapropriado para a contribuição com a resistência à tração do concreto pois, diminuiu a resistência a partir desse volume, sendo recomendado uma taxa até 0,50% de fibras/m<sup>3</sup>.

Todos os grupos com fibras apresentaram mudança do comportamento frágil para um comportamento dúctil, essa contribuição ocorreu principalmente pelo efeito costura da ancoragem das fibras no concreto, garantido pela boa relação interfacial granulométrica com as fibras, com perfeita aderência das fibras na matriz.

Alcançada a cessão da pesquisa, foi possível contribuir no estudo de concreto reforçado com fibras de polipropileno esclarecendo pontos importante desde o processo de caracterização e dosagem dos materiais aos ensaios mecânicos. Como sugestões de futuras pesquisa, realizar um estudo sobre a contribuição do agregado graúdo na relação interfacial de concreto reforçado com fibras de polipropileno. Realizar ensaios de arrancamentos e ancoragem das fibras do tipo macrofibras. Realizar ensaios de arrancamentos de pinos em de concreto reforçado com fibras do tipo macrofibras. Realizar ensaios de impactos de concreto reforçado com Fibras do tipo macrofibras e por fim, ensaios de concreto reforçado com fibras de polipropileno em situações de incêndio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 16940: Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistência residuais) – Método de ensaio.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Mercosul 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente,** 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2018.

ARAÚJO, L. S. **Análise experimental do uso da fibra de pet (Polietileno Tereftalato) em concreto estrutural convencional.** Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste do Pará. Itaituba, 2023.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** V 1, 6ª edição. Rio de Janeiro, 2019.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** 2ª edição. Elsevier. London, 1990.

CARVALHO, A. R. **Avaliação das propriedades mecânicas do concreto com adição de fibras para confecção de anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túnel de metrô.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

CALLISTER JR, W.; RETHWISCH, D.G. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais - Abordagem Integrada: Uma Abordagem Integrada.** Editora LTC, 10ª Edição, 2020.

CUNHA, W. A. **Influência no comportamento mecânico do concreto com a utilização de microfibras de polipropileno para redução do efeito de retração: um estudo realizado em Belém do Pará.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de

Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Tucuruí, 2022.

CHOI, T.; YUAN, R.L. **Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 1587 – 1591, 2005.

DI PRISCO, M., PLIZZARI, G., VANDEWALLE, L., **Fibre reinforced concrete: new design perspectives**, *Materials and Structures*, v. 42, n.9, pp. 415-425, 2009.

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto com fibras de aço*. Boletim Técnico: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras**. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Edição: Geraldo Cechella Isaia, p 1194-1225, IBRACON. São Paulo, 2005.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras**. Tese (Livre Docência) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Construção Civil. São Paulo, 2011.

GENCEL, O.; OZEL, C.; BROSTOW, W.; MARTINEZ-BARRERA, G. **Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres**. Materials Research Innovations, v15, p. 216- 225, 2011.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. 3º edição, IBRACON. São Paulo, 2007.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2017.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.; **Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais**. 1º edição, IBRACON. São Paulo, 2008.

NZAMBI, A. K. L. L.; OLIVEIRA, D. R. C. de; COÊLHO, E. L. P. **Análise experimental de pilares de concreto com armadura de bambu sob flexocompressão**. Ambiente Construído, v. 24, e126982, jan./dez. Porto Alegre, 2023.

NUNES, L. N.; AGOPYAN, V. A **Influência do Fator de Forma da Fibra na Tenacidade à Flexão do Concreto Reforçado com Fibras de Aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Boletim Técnico. São Paulo, 1998.

PERES, M. V. N. do N.; CAETANO, L. F.; BIAZETTO, B.; FILHO, L. C. P. da S. **Estudo comparativo da eficiência da adição de fibras de aço e polipropileno no comportamento do concreto à flexão**. 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis, 2011.

SILVA, J. M. **Caracterização física e mecânica de uma matriz cimentada composta por resíduos da construção civil e reforçada com fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UPF. Passo Fundo, 2020.

SILVA, V. A; COSTA Jr. R. F; VIANNA, A. C. S. L; BARTKO, N.; RODRIGUES Jr. A. S.; GOMES, G. J. C. **Análise do comportamento de estruturas de concreto com fibra de polipropileno sob flexão**. Revista Teccen v. 12. Rio de Janeiro, 2019.

SOARES, J. M. D.; BICA, A. V. D.; BRESSANI, L. A.; MARTINS, F. B. **Medição local de deformações utilizando sensores de efeito Hall**. Solos e Rochas, v.17, n.3, p.183-188. São Paulo, 1994.

TRICHÊS, G. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento**. Tese (Doutorado em Engenharia) – ITA. São José dos Campos, 1993.