



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

**JEICYANE CRISTINE SARGES DAMASCENO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PLACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO COM  
FIBRAS DE AÇO**

**ITAITUBA/PA**

**2025**

**JEICYANE CRISTINE SARGES DAMASCENO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PLACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO COM  
FIBRAS DE AÇO**

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: Dr. Jonas dos Santos Leite

**ITAITUBA/PA**

**2025**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA**

---

- D155e     Damasceno, Jeicyane Cristine Sarges  
              Estudo experimental de placas pré-moldadas de concreto com fibras de aço /  
              Jeicyane Cristine Sarges Damasceno. – Itaituba (PA), 2025.  
              59 p.: il.  
              Inclui bibliografias.
- Orientador: Jonas dos Santos Leite.  
              Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste  
              do Pará, Campus de Itaituba, Bacharelado em Engenharia Civil.
1. Concreto reforçado com fibras de aço. 2. Resistência à tração. 3. Placas pré-  
              moldadas. 4. Ensaio de flexão. I. Leite, Jonas dos Santos, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 620.136

**JEICYANE CRISTINE SARGES DAMASCENO**


**ESTUDO EXPERIMENTAL DE PLACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO  
COM FIBRAS DE AÇO**

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: Dr. Jonas dos Santos Leite.


Conceito: APROVADA

Data da Aprovação: 28/03/2025

Documento assinado digitalmente  
 **JONAS DOS SANTOS LEITE**  
Data: 11/03/2025 10:24:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Jonas dos Santos Leite - Orientador  
Universidade Federal do Oeste do Pará

Documento assinado digitalmente  
 **LUAMIM SALES TAPAJÓS**  
Data: 11/03/2025 16:25:16-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Me. Luamim Sales Tapajós - Avaliador  
Universidade Federal do Oeste do Pará

Documento assinado digitalmente  
 **MARCELA SANTOS DA SILVA**  
Data: 12/03/2025 10:17:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Ma. Marcela Santos da Silva - Avaliadora  
Universidade Federal do Oeste do Pará

*Dedico este trabalho aos meus pais, minhas irmãs e toda a minha família, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio e inspiração. Aos amigos que compartilharam este sonho comigo, tornando essa conquista ainda mais especial.*

## AGRADECIMENTOS

Sou imensamente grata, antes de tudo, à DEUS, meu porto seguro nos momentos de incertezas. Nos dias mais difíceis foi Ele quem me sustentou e me deu forças para prosseguir.

Aos meus pais, Josemir Lopes Damasceno e Cristiane de Oliveira Sarges, minha eterna gratidão. Vocês sempre acreditaram em mim, enxergaram meu potencial, e me ensinaram que, com esforço, dedicação e algumas renúncias, eu poderia alcançar tudo o que sonhei. Obrigado por cada palavra de incentivo, por cada sacrifício feito por mim.

Às minhas irmãs, Jhersey, Jéssica e Jennifer, que estiveram ao meu lado em cada etapa dessa jornada. Sempre será nós quatro, independente do que a vida nos reserve. Sei que posso contar com vocês, assim como vocês sempre poderão contar comigo.

Às minhas sobrinhas, Lauren e Louise, que trouxeram luz e um novo sentido à minha vida. Aos meus queridos avós, João Damasceno e Maria Aparecida, sou grato pelos ensinamentos preciosos. Suas palavras e valores me acompanham e sempre me guiarão.

E, com um carinho especial, agradeço à minha avó Maria Celza (in memoriam). Sei que, de onde estiver, está sorrindo, orgulhosa por essa conquista. De maneira geral, minha gratidão se estende a toda minha família, meus padrinhos, tios, primos.

Aos meus amigos, Rayanne, Emanuel, Carlos, Lucca e Cledwilson, e a todos que, de alguma forma, fizeram parte da minha vida acadêmica, minha turma de 2020 e tantos outros colegas com quem tive o privilégio de compartilhar momentos inesquecíveis, meu muito obrigada.

Meu agradecimento especial ao meu orientador, Dr. Jonas dos Santos Leite, por sua dedicação, paciência e por ter me guiado nessa etapa tão importante. Obrigada pelo tempo disponibilizado, pelos conselhos valiosos e por compartilhar comigo seu conhecimento.

Agradeço ao Laboratório de Tecnologia da Madeira do Instituto de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Santarém, pela colaboração para realização dos ensaios mecânicos. E, por fim, minha imensa gratidão a todos os professores que contribuíram para a minha formação. Em especial, agradeço à Ma. Marcela Santos, que, em diversos momentos, foi mais que uma professora.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre o comportamento mecânico de placas pré-moldadas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA). Buscou-se neste estudo analisar a influência de diferentes tipos e teores de fibras de aço na resistência à tração na flexão dessas placas. Dessa forma, foram moldadas 21 placas com variações de fibras do tipo Wiremix W40, Dramix 3D 45/50 BN e Dramix 3D 65/60 BG, em teores de 1,0% e 1,5%. Os ensaios foram conduzidos com base na NBR 12142 (ABNT, 2010), utilizando o método de flexão em quatro pontos. Os resultados mostraram que a adição de fibras melhorou significativamente a resistência mecânica e a ductilidade das placas, reduzindo a fragilidade característica do concreto convencional. Do ponto de vista econômico, o teor de 1,0% para os Tipos 2 e 3 se mostrou mais vantajoso, uma vez que o aumento para 1,5% não resultou em ganhos significativos de resistência, nem em diferenças relevantes relacionadas ao tipo de fibra utilizada. Além disso, identificou-se que o teor e o tipo de fibra influenciam diretamente o desempenho do material, destacando a importância da escolha adequada da dosagem para aplicações estruturais.

**Palavras-chave:** concreto reforçado com fibras de aço, resistência à tração, placas pré-moldadas, ensaio de flexão.

## ABSTRACT

This study presents an experimental investigation on the mechanical behavior of precast concrete slabs reinforced with steel fibers (SFRC). The objective of this research was to analyze the influence of different types and dosages of steel fibers on the flexural tensile strength of these slabs. Accordingly, 21 slabs were cast using variations of Wiremix W40, Dramix 3D 45/50 BN, and Dramix 3D 65/60 BG fibers at dosages of 1.0% and 1.5%. The tests were conducted in accordance with NBR 12142 (ABNT, 2010), employing the four-point bending method. The results demonstrated that the addition of fibers significantly improved the mechanical strength and ductility of the slabs, reducing the inherent brittleness of conventional concrete. From an economic perspective, a 1.0% dosage for Fiber Types 2 and 3 proved to be more advantageous, as increasing it to 1.5% did not result in significant strength gains or notable differences regarding fiber type. Furthermore, it was identified that both fiber dosage and type directly influence material performance, highlighting the importance of proper dosage selection for structural applications.

**Keywords:** Steel fiber reinforced concrete, Tensile strength, Precast slabs, Flexural test.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de perfis de fibras de arames trefilados a frio (Grupo I).....	20
Figura 2 – Exemplos de perfis de fibras de chapas cortadas (Grupo II).....	21
Figura 3 – Exemplo de perfil de fibras de arames trefilados a frio e escarificados (corrugada), (Tipo C).....	21
Figura 4 - Compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo.....	22
Figura 5 - Mecanismo de transferência de tensões pelas fibras.....	23
Figura 6 - Tubo de CRF sendo submetido ao ensaio de compressão diametral.....	26
Figura 7 - Tipos de fibras de polipropileno.....	27
Figura 8 - Fibra de vidro picada.....	28
Figura 9 - Dispositivo de ensaio (perspectiva).....	31
Figura 10 - Dispositivo de ensaio de flexão de quatro pontos.....	31
Figura 11 - Ruptura fora do terço médio.....	32
Figura 12 - Sistema de ensaio de 4 pontos para as placas (Unidade de mensuração em milímetros).....	37
Figura 13 – Montagem do Sistema de ensaio de 4 pontos das placas.....	38
Figura 14 - Caracterização do Cimento Portland CP II Z 32.....	39
Figura 15 - Agregado miúdo.....	39
Figura 16 – Agregado graúdo.....	40
Figura 17 – Geometria da fibra de aço Wiremix W40.....	41
Figura 18 – Geometria das fibras de aço Tipo 2 – 3D Dramix 45/50 BN.....	41
Figura 19 - Geometria e propriedades das fibras de aço 3D Dramix 65/60 BG.....	42
Figura 20 - Preparação das formas das placas pré-moldadas.....	43
Figura 21 – Preparação do concreto reforçado com fibras de aço na betoneira.....	43
Figura 22 - Concreto sem adição de fibras.....	44
Figura 23 - Processo de cura das placas pré-moldadas.....	44
Figura 24 – Peças pré-moldadas após desformar.....	45
Figura 25 – Ensaio de tração na flexão.....	46
Figura 26 – Placa de referência 0% de fibras.....	47
Figura 27 – Placa 0,0% fibra com ruptura brusca do concreto.....	48
Figura 28 – Placas de concreto reforçados com fibras Tipo 1 – Wiremix W40.....	49
Figura 29 – Qualidade do concreto placas 1,5%.....	50
Figura 30 – Placas PC2 1,0% de fibras.....	51

Figura 31 – Detalhamento da ancoragem das fibras PC2 1,0% fibras.....	51
Figura 32 – Placas PC3 1,0% de fibras .....	52
Figura 33 - Detalhamento da ancoragem das fibras PC3 1,0% fibras .....	53
Figura 34 – Placas PC3 1,5% de fibras .....	54
Figura 35 – Detalhamento de ancoragem das fibras PC3 1,5%.....	54
Figura 36 – Comparação entre cada grupo estudado.....	55

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Descrição das amostras das placas de referência.....	36
Tabela 2 - Descrição das amostras das placas TP1.....	36
Tabela 3 - Descrição das amostras das placas TP2.....	36
Tabela 4 - Descrição das amostras das placas TP3.....	36
Tabela 5 Consumo de materiais utilizados na fabricação do CRFA.....	40
Tabela 6 – Resultado do ensaio de tração sem adição de fibras 0,0%.....	47
Tabela 7 - Resultado ensaio de tração PC1 1,0%.....	48
Tabela 8 – Resultado ensaio de tração PC1 1,5%.....	49
Tabela 9 – Resultado ensaio de tração PC2 1,0%.....	50
Tabela 10 – Resultado ensaio de tração PC2 1,5%.....	52
Tabela 11 – Resultado ensaio de tração PC3 1,0%.....	53
Tabela 12 - Resultado ensaio de tração PC3 1,5%.....	54

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
ASTM	American Society For Testing And Materials
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço
EN	Normas Europeias
NBR	Norma Técnica Brasileira
CMOD	Medida de Abertura do Entalhe
CP	Cimento Portland
CP's	Corpo de Prova
FQP	Fadiga Quatro Pontos
GPa	Giga Pascal
LOP	Limite de Proporcionalidade
FP	Resistência residual à tração na flexão
MPa	Mega Pascal
$\lambda_f$	Fator de forma da fibra ( $l_f/d_f$ )
$d_f$	Diâmetro da fibra

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>16</b>
1.1.1 Geral.....	16
1.1.2 Específicos .....	16
<b>1.2. Justificativa</b> .....	<b>17</b>
<b>2. REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 Histórico do concreto com fibras</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2 Fibras de aço para concreto</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Propriedades do Concreto com Fibras de Aço</b> .....	<b>22</b>
<b>2.4 Principais Aplicações</b> .....	<b>24</b>
2.4.1 Concreto na Construção de Pavimentos .....	24
2.4.2 Concreto em revestimentos de túneis .....	24
2.4.3 Concreto em Tubos para Obras de Saneamento .....	25
<b>2.5 Outros Tipos de Fibras Aplicado ao Concreto</b> .....	<b>26</b>
2.5.1 Fibras de Polipropileno.....	26
2.5.2 Fibras de Vidro.....	27
<b>2.6 Recomendações Normativas para CRF</b> .....	<b>28</b>
2.6.1 NBR 16940 (ABNT, 2010): Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão – Método de ensaio .....	29
2.6.2 NBR 12142 (ABNT, 2010): Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.....	30
<b>2.7 Ensaio em Placas</b> .....	<b>32</b>
2.7.1 Tipos de ensaios realizados em Placas de Concreto Reforçado em Fibras de Aço .....	33
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1 Características das placas de concreto reforçados com fibras de aço CRFA</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2 Sistema de ensaio</b> .....	<b>37</b>

<b>3.3 Caracterização dos materiais .....</b>	<b>38</b>
3.3.1 Dosagem.....	38
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1 Resistência mecânica à tração na flexão.....</b>	<b>46</b>
4.1.1 Placas de referência (sem adição de fibras) .....	46
4.1.2 Placas Tipo 1 - Wiremix W40 (1,0% de Fibras).....	48
4.1.3 Placas Tipo 1 - Wiremix W40 (1,5% de Fibras).....	49
4.1.4 Placas Tipo 2 - 3D DRAMIX 45/50 BN, 1,0% de fibras.....	50
4.1.5 Placas Tipo 2 - 3D DRAMIX 45/50 BN, 1,5% de fibras.....	52
4.1.6 Placas Tipo 3 - 3D DRAMIX 65/60 BG, 1,0% de fibras.....	52
4.1.7 Placas Tipo 3 - 3D DRAMIX 65/60 BG, 1,5% de fibras.....	53
4.1.8 Comparação entre as amostras.....	55
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais amplamente utilizados na construção civil em diversos países, e a sua composição resulta em um material com excelentes propriedades de resistência e durabilidade. Apesar dessas qualidades, o concreto simples demonstra um comportamento bastante frágil por possui uma baixa capacidade de deformação antes de vim a ruína quando é submetido aos esforços de tração, por exemplo, dizemos que para essas condições o material é caracterizado por ser um material frágil.

Nesse contexto, devido a essas limitações, há a necessidade de reforçar este material na região tracionada para garantir melhor aproveitamento do material a frentes desses esforços de tração. Atualmente as armaduras de aço são os mecanismos de reforço mais utilizado, mudando do concreto simples para o concreto armado, onde essa limitação é compensada pelo reforço de barras de aço.

Nesse sentido, com a proposta de melhorar as propriedades à tração do concreto simples, pode-se empregar alguns materiais alternativos além das barras de aço tradicionalmente. Dentre outros tipos, nos últimos anos o emprego das fibras tem se destacados, principalmente as fibras de aço. Conforme Barros (1995), as fibras de aço aprimoram várias propriedades do concreto simples e armado, como a maior ductilidade e tenacidade, maior controle da fissuração e a maior resistência às ações dinâmicas e aos impactos.

A eficácia das fibras em melhorar as propriedades mecânicas do concreto pode ser atribuída principalmente aos mecanismos responsáveis pela transferência de tensões entre a fibra e o concreto fissurado, viabilizando, dessa maneira, o seu efeito de “costura”, (Leite *et al.*, 2023).

No mercado, há uma grande variabilidade de fibras disponíveis, feitas de diferentes materiais e com formas variadas, as mais comuns são, aço, polipropileno, carbono, vidro, dentre outras, cada uma oferecendo desempenhos distintos. O uso de fibras não é uma prática nova, há exemplos históricos que incluem a adição de palha ao barro para a fabricação de tijolos e as crinas de cavalo usadas em argamassas pelos romanos, evidenciando a aplicação ancestral de fibras na construção.

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) é um composto constituído por concreto (matriz) e Fibras (reforço) e representa uma evolução significativa na engenharia de materiais, combinando as propriedades do concreto tradicional com as vantagens de um reforço disperso por fibras.

É de salientar que a eficiência de um CRFA (Concreto Reforçado com Fibras de Aço), está fundamentalmente ligada à dosagem das fibras, propriedades físicas e mecânicas e as características.

Segundo Figueiredo (2011), no Brasil há muitas aplicações do CRF, sempre estão associadas a obras de grande impacto social e que são carências críticas da sociedade brasileira. Exemplo claro disso são as obras de infraestrutura, notadamente as de saneamento básico e de transportes.

Além dessas aplicações, as fibras de aço são empregadas em grande escala no meio científico para melhorar as propriedades do concreto em elementos estruturais, como em vigas, lajes, paredes armadas, tubulações pré-moldadas etc.

As fibras de aço devido apresentarem uma contribuição significativa na resistência à tração do concreto, como pode ser visto nas pesquisas de (Moraes Neto, 2013; Leite, 2023; Ning *et al.*, 2015), elas ainda podem contribuir na resistência residual após a fissuração (alteração no modo de ruína).

Nesse sentido, a presente pesquisa aborda um estudo experimental, através de ensaios de placas pré-moldadas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), com o objetivo de investigar o desempenho do concreto reforçado com diferentes tipos de fibras e distintas dosagens, analisando sua contribuição para a resistência à tração nas placas pré-moldadas em ensaios de tração de quatro pontos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Aprimorar o conhecimento sobre concreto reforçado com fibras de aço por meio de um estudo experimental que avalie seu desempenho mecânico e sua viabilidade para aplicações estruturais.

### **1.1.2 Específicos**

Desenvolver um programa experimental de concreto reforçado, utilizando diferentes tipos de fibras de aço, por meio de ensaios mecânicos de tração em placas de CRFA.

Comparar o desempenho mais eficiente do tipo de fibra de aço na matriz do concreto.

Determinar o teor ideal de fibras na matriz do concreto;

Avaliar a contribuição da resistência do concreto com e sem fibras.

Verificar a viabilidade econômica de produção em longa escala de placas, a partir da contribuição da resistência à tração.

## **1.2. Justificativa**

O presente estudo se justifica pela necessidade de explorar novas soluções para a engenharia civil, com foco na otimização de materiais que possam melhorar o desempenho estrutural e a durabilidade das construções. Em particular, a escolha do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) para aplicação em placas de concreto pré-moldadas deve-se ao seu alto potencial de resistência e à capacidade de minimizar fissurações, fatores essenciais para ampliar sua utilização em projetos que exigem elevada robustez e menor necessidade de manutenção. Os objetivos estabelecidos buscam não apenas aprimorar as propriedades mecânicas do concreto, especialmente sua resistência à tração, mas também avaliar sua viabilidade econômica para produção em larga escala. Além disso, a incorporação de fibras de aço contribui significativamente para a longevidade das estruturas, tornando-se uma alternativa estratégica em regiões sujeitas a condições ambientais severas ou elevados esforços mecânicos. Através deste estudo experimental, espera-se comprovar os benefícios do CRFA na engenharia civil, impulsionando inovações que viabilizem projetos arquitetônicos e estruturais mais eficientes e duradouros.

## 2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 Histórico do concreto com fibras

O concreto reforçado com fibras (CRF) é uma tecnologia que surgiu para melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto. Atualmente, marcada por avanços na pesquisa e desenvolvimento de diferentes tipos de fibras e suas aplicações.

De acordo com Neville (1996), o uso de fibras para reforçar o concreto tem suas origens no início do século XX. Entre as primeiras evidências de utilização de fibras no concreto estão as patentes e estudos da década de 1920, período em que as fibras de aço começaram a ser investigadas com o objetivo de aumentar a resistência à tração do concreto.

Durante as décadas de 1960 e 1970, houve um aumento significativo no interesse por fibras de aço. Análises de Hsu & Mo (1968), demonstraram que a adição de fibras de aço poderia melhorar consideravelmente a resistência ao impacto e a durabilidade do concreto, particularmente em aplicações como pavimentos e estruturas sujeitas a cargas pesadas. Esta pesquisa ajudou a estabelecer as bases para o uso generalizado de fibras de aço no concreto.

Na década de 1980, a pesquisa começou a se expandir para fibras sintéticas, como as de polipropileno e nylon. Segundo Mehta & Monteiro (2006), as fibras sintéticas mostraram-se eficazes na redução da fissuração plástica e na melhoria das propriedades do concreto fresco. Essas fibras têm a vantagem adicional de serem mais leves e resistentes à corrosão, em comparação com as fibras de aço.

A década de 1990 ficou marcada pelo início da exploração de fibras de vidro e carbono. Aïtcin (2008), discutiu como as fibras de vidro oferecem alta resistência à tração e ao impacto, enquanto as fibras de carbono, embora mais caras, proporcionam desempenho estrutural excepcional em aplicações de engenharia civil avançada. Essas fibras têm sido usadas em projetos de alta performance e em estruturas onde as exigências mecânicas são particularmente rigorosas.

Nos anos 2000 e além, o foco se ampliou para a sustentabilidade e o uso de fibras naturais. Estudos recentes de Chou *et al* (2010), têm explorado o potencial das fibras naturais, como sisal e juta, para melhorar a resistência do concreto enquanto reduzem o impacto ambiental. Estas fibras não apenas ajudam a melhorar as propriedades mecânicas do concreto, mas também oferecem uma alternativa ecológica às fibras sintéticas e metálicas.

Nas últimas três décadas, uma vasta quantidade de pesquisas comprovou a alta eficácia das fibras de aço como substitutas das armaduras convencionais em várias aplicações

estruturais. Estudos indicam que elementos como drenagens pluviais, bueiros, travessias e até tubos para esgoto sanitário que operam em ambientes agressivos devido à presença de efluentes químicos demonstram um desempenho superior quando reforçados com fibras de aço. Nessas estruturas, observou-se uma significativa capacidade de suporte pós-fissuração, permitindo que o concreto continue a suportar cargas substanciais mesmo após o aparecimento de fissuras. Isso resulta em uma redistribuição eficiente das tensões, prevenindo falhas prematuras e garantindo maior integridade estrutural ao longo do tempo (Gomes, 2010).

Além disso, o progresso em técnicas de incorporação e métodos de processamento do concreto continua a avançar. Li (2003), destacou que os compostos cimentícios engenhados e as inovações na formulação de novos tipos de fibras estão ampliando constantemente as aplicações e os benefícios do concreto reforçado com fibras.

## **2.2 Fibras de aço para concreto**

As fibras de aço desempenham um papel fundamental como barreiras à propagação de fissuras no compósito cimentício. Segundo Toledo Filho et al. (2005), as fibras interceptam as microfissuras que se formam durante o endurecimento da pasta de cimento, distribuindo as tensões e retardando o surgimento de microfissuras. No concreto endurecido, elas restringem tanto o comprimento quanto a abertura das fissuras, o que também reduz a permeabilidade do concreto, aumentando sua durabilidade.

De acordo com Naaman (2003) as fibras usadas no concreto podem ser classificadas de diferentes modos, quanto ao material constituinte (metálicas, minerais, naturais e sintéticas), quanto às propriedades físico-químicas (densidade, rugosidade da superfície, estabilidade química etc.) e quanto às propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade, rigidez, ductilidade etc.)

As fibras de aço mostram maior eficiência na contenção de fissuras em relação aos demais tipos, evitando o seu desenvolvimento, no entanto, não garantem a total eliminação do surgimento de fissuras. Um caso grave é acreditar que as fibras sejam uma solução definitiva para o concreto, o que é incorreto, pois ainda não é possível encontrar um concreto que por causa da adição de novos componentes no mercado, seja ele qual for, evite a fissuração, principalmente por retração (Oliveira *et al*, 2010).

De acordo com a norma americana American Concrete Institute (ACI 544.1R-96), as fibras de aço usadas no reforço do concreto são projetadas para serem suficientemente curtas, permitindo que se distribuam de maneira aleatória na massa de concreto fresco. A NBR 15530

(ABNT, 2019) classifica as fibras de aço com base em sua geometria (Tipos A, C e R) e no tipo de aço utilizado em sua fabricação (Grupos I, II e III), como ilustrado na Figura 1, 2 e 3.

Segundo a NBR 15530 (ABNT, 2019), as fibras de aço são classificadas em grupos, de acordo com o material de base usado para a produção das fibras.

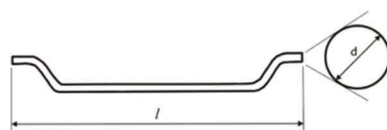
Grupo I: arames trefilados a frio.

Este grupo possui três tipos de fibras de acordo com seus perfis, sendo:

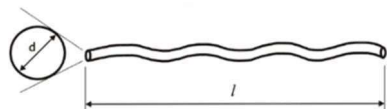
- Com ancoragem nas extremidades (Hooked): Tipo A
- Com ondulações no corpo (corrugada): Tipo C
- Reta sem ancoragens (lisas): Tipo R

Os exemplos de perfis de fibras do Grupo I são apresentados na Figura 1.

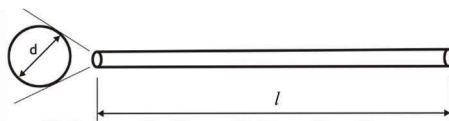
Figura 1 – Exemplos de perfis de fibras de arames trefilados a frio (Grupo I)



a) Fibra com ancoragens nas extremidades (Tipo A)



b) Fibra com ondulações no corpo (Tipo C)



c) Fibra com reta sem ancoragem (Tipo R)

Fonte: NBR 15530 (ABNT, 2019).

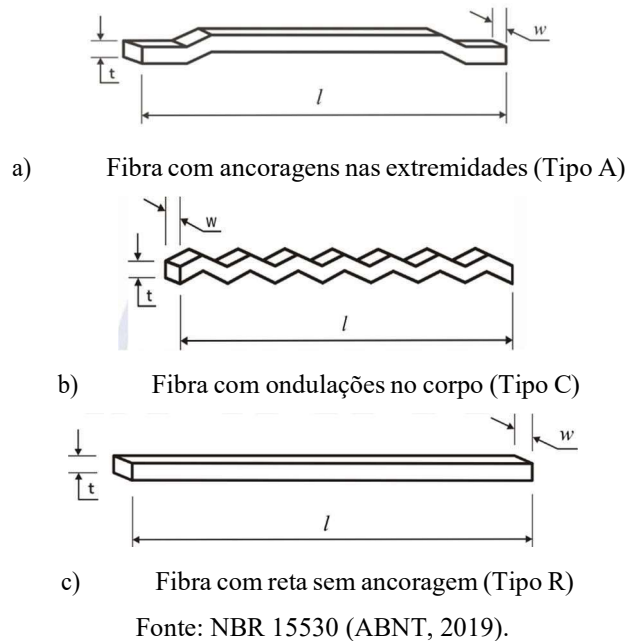
Grupo II: chapas cortadas.

Este grupo possui três tipos de fibras de acordo com seus perfis, sendo:

- Com ancoragem nas extremidades (Hooked): Tipo A
- Com ondulações no corpo (corrugada): Tipo C
- Reta sem ancoragens (lisas): Tipo R

Os exemplos de perfis de fibras de chapas do Grupo II são apresentados na Figura 2.

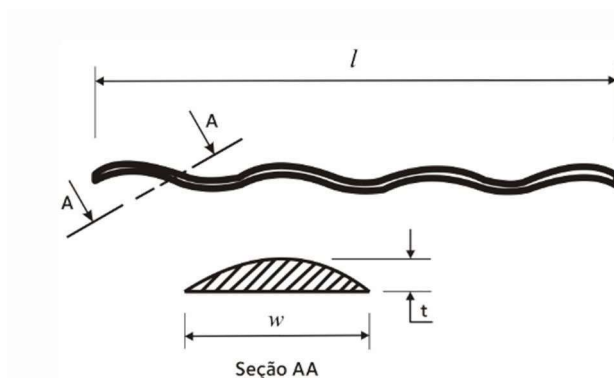
Figura 2 – Exemplos de perfis de fibras de chapas cortadas (Grupo II)



Grupo III: arames trefilados a frio e escarificados (*shaved*).

A fibra deste grupo apresenta seu perfil com ondulações (corrugada), sendo esta do Tipo C. Os exemplos de perfis de fibras de chapas do Grupo II são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Exemplo de perfil de fibras de arames trefilados a frio e escarificados (corrugada), (Tipo C).



Fonte: NBR 15530 (ABNT, 2019).

Grupo IV: fibras produzidas por fusão (*melt extracted*).

Fibras metálicas produzidas por processo industrial envolvendo basicamente um elemento rotativo posicionado junto à superfície de um banho do metal fundido

A conformação filamentar da fibra ocorre devido ao rápido escoamento e resfriamento do metal pela extremidade dos dentes deste elemento rotativo.

Grupo V: usinadas a partir de blocos de aço

Fibras de aço obtidas a partir do processo de corte de um bloco de aço utilizando uma ferramenta de corte.

Além dessas classificações, a NBR 15530 (ABNT, 2019) também estabelece limites para o fator de forma e a resistência à tração das fibras. A resistência à tração que deve ser suficientemente alta para garantir a eficiência no reforço do concreto.

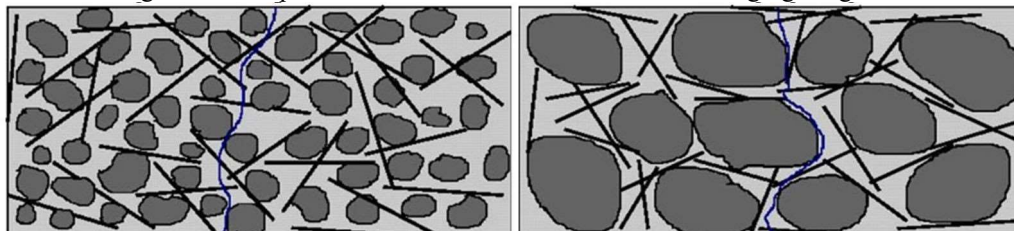
### 2.3 Propriedades do Concreto com Fibras de Aço

O concreto com fibras é um concreto contendo cimento, água, agregados miúdos, agregados graúdos e fibras discretas descontínuas. Não são considerados malhas contínuas, tecidos trançados e longas barras como tipos de fibras discretas para adição em elementos de concreto. O concreto com fibras pode eventualmente conter adições minerais para melhorar a sua resistência e/ou trabalhabilidade. As pozolanas e os superplastificantes são os principais aditivos usados nesse tipo de concreto (Mehta & Monteiro, 1994)

A geometria, volume relativo das fibras e a dimensão máxima dos agregados são aspectos importantes que devem ser considerados quando da utilização de fibras de aço em matrizes de concreto. A dimensão máxima dos agregados é de grande importância para concretos com fibras, pois esses concretos não devem conter partículas maiores que 20 mm e, de preferência, não maiores que 10 mm, para não dificultar a distribuição uniforme das fibras.

De acordo com Figueiredo (2019), a trabalhabilidade e o desempenho das fibras na transferência de tensão estão diretamente relacionados a dimensão dos agregados utilizados, que deverá ser metade do comprimento da fibra utilizada. Na Figura 4, é possível observar que à medida que se aumenta a dimensão do agregado, a distribuição das fibras torna-se menos uniforme.

Figura 4 - Compatibilidade dimensional entre as fibras e o agregado graúdo.



Fonte: Figueiredo, 2000.

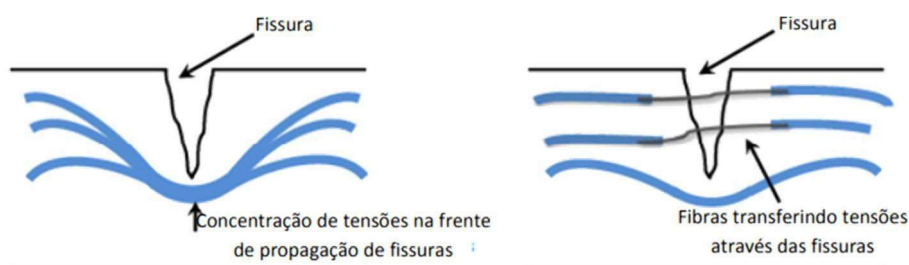
Segundo Gencil *et al.*, (2011), as propriedades mecânicas do concreto podem ser melhoradas com a adição de fibras curtas, que são distribuídas e orientadas aleatoriamente. Essas fibras contribuem para a prevenção e controle da formação e propagação de fissuras no

material, promovendo uma distribuição mais uniforme das tensões no concreto. Isso é especialmente eficaz no início do processo de fissuração, alterando o comportamento do concreto e aumentando sua eficiência em termos de propriedades à tração.

Conforme afirmam Bentur & Mindess (2007), a inclusão de fibras no concreto tem pouco ou nenhum impacto na resistência à compressão e no módulo de elasticidade. Além do mais, conforme a ACI 544.2R-89 (2004), as fibras, quando usadas em quantidades típicas (menos de 2% em volume), não proporcionam melhorias significativas na resistência à compressão do concreto. No entanto, essas fibras demonstram uma maior eficácia nas propriedades de tração do material.

As fissuras que frequentemente surgem em materiais cimentícios estão geralmente associadas à baixa resistência à tração e à limitada capacidade de deformação desses materiais. A principal função das fibras é transformar essas matrizes, tradicionalmente frágeis, em materiais "quase dúcteis", conforme descrito por Bentur & Mindess (1990). Isso resulta em um aumento da resistência a esforços de impacto e tração, reduzindo a formação de fissuras. As fibras agem como pontes que transferem as tensões concentradas nas regiões fissuradas, dificultando a propagação das fissuras e minimizando sua abertura. (ver Figura 5)

Figura 5 - Mecanismo de transferência de tensões pelas fibras



Fonte: Nunes, Tanesi, Figueiredo, 1997.

O concreto reforçado com fibras se comporta como um material dúctil sob flexão, oferecendo excelente desempenho em condições de deflexão. Ele demonstra uma alta capacidade de deformação e permite a formação de finas fissuras, o que possibilita o seu uso em um estado de múltiplas fissuras. A ductilidade do material decorre da criação de microfissuras que permanecem sob controle até que o limite de deformação seja atingido. Essas propriedades garantem a sua ampla utilização em situações em que a carga aplicada provoca deformações (Silva *et al.*, 2019)

## 2.4 Principais Aplicações

### 2.4.1 Concreto na Construção de Pavimentos

A aplicação de concretos reforçados com fibras de aço em pavimentos é uma das principais no Brasil, além do uso em revestimentos de túneis. Isso se deve às várias vantagens tecnológicas oferecidas pelas fibras de aço em pavimentos. A principal vantagem é a eliminação da necessidade de instalação da armadura, o que reduz o tempo total de execução e o número de trabalhadores necessários. Além disso, há uma economia de espaço na obra, já que não é necessário realizar a armazenagem da armadura. (Figueiredo, 2011)

Outra vantagem na utilização da Fibra de aço na construção de pavimentos, é o fato de não ser necessário a utilização de espaçadores, e no caso, da utilização de um concreto com consistência adequada e sem excesso de vibração assegura o reforço uniforme de toda a espessura do pavimento.

No entanto, o uso de fibras no concreto não é isento de desvantagens. Embora as fibras ajudem a reduzir a fissuração do pavimento, elas podem aumentar o risco de empenamento devido à retração diferencial. Por isso, é crucial tomar cuidados rigorosos durante a cura. Mesmo com um acabamento superficial adequado, algumas fibras podem permanecer na superfície do concreto, tornando-se susceptíveis à corrosão e, conseqüentemente, provocando o surgimento de pontos de ferrugem que comprometem o aspecto estético do pavimento. (Figueiredo, 2011).

### 2.4.2 Concreto em revestimentos de túneis

Existem dois tipos de concretos amplamente utilizados no revestimento de túneis onde as fibras são frequentemente empregadas, o concreto projetado e o pré-moldado. No caso do concreto projetado, há uma restrição significativa quanto ao comprimento das fibras devido ao transporte através de tubulações. Segundo a NBR 11768 (ABNT, 2018), o comprimento das fibras deve ser limitado para garantir que o concreto passe eficientemente pela tubulação. Como os diâmetros das tubulações são tipicamente em torno de 65 mm, o uso de fibras curtas é recomendado para o reforço do concreto projetado (Souza, 2018).

A aplicação de fibras no concreto projetado é comum em revestimentos de túneis urbanos, metroviários, de desvio, adução e interceptores de esgoto devido a diversas vantagens tecnológicas. Uma das principais vantagens é que o concreto projetado reforçado com fibras

pode ser aplicado imediatamente após a escavação, reduzindo o risco de acidentes causados por desprendimentos do maciço.

Além disso, a eliminação da fase de instalação da tela metálica acelera a execução do túnel, sendo um dos principais benefícios do uso das fibras que incluem uma maior velocidade na execução das peças, resultante da eficiência aprimorada no sistema industrial utilizado para sua fabricação. No entanto, uma desvantagem é que a aceleração da construção pode exigir uma resistência inicial mais alta do concreto (Celestino, 1996).

Normalmente, o revestimento primário de concreto projetado apresenta uma grande quantidade de fissuras devido às deformações iniciais do maciço recém escavado. A utilização de fibras ajuda a reduzir essas fissuras, impedindo sua propagação e, conseqüentemente, aumentando a durabilidade do revestimento. Isso ocorre porque a redução das fissuras diminui os caminhos preferenciais para a entrada de agentes agressivos no túnel (Figueiredo, 1997).

O uso de fibras de aço na produção de segmentos para túneis fabricados com sistemas mecanizados ou TBM (Tunnel Boring Machine) oferece a vantagem adicional de reduzir o risco de perda de segmentos durante o manuseio, devido à maior resistência a impactos proporcionada pelas fibras (Figueiredo, 2005).

O surgimento de destacamentos superficiais pode resultar em uma significativa perda de desempenho dos segmentos, que estarão sujeitos a elevados níveis de tensão durante o avanço da tuneladora, que apoia seus macacos hidráulicos nos anéis recém instalados. A dosagem de fibras para a produção desses segmentos segue os mesmos procedimentos usados para concretos plásticos destinados a pavimentos. Contudo, é essencial avaliar o desempenho do compósito em idades menores (Telles; Figueiredo, 2006).

#### 2.4.3 Concreto em Tubos para Obras de Saneamento

A indústria de pré-moldados representa outro expressivo campo de aplicação para concretos com fibras, graças à maior agilidade de produção que essas fibras proporcionam. As vantagens do uso de fibras neste contexto são similares às observadas na produção de anéis segmentados para revestimento de túneis.

No Brasil, o uso de concretos reforçados com fibras de aço para a fabricação de tubos de esgoto é regulado pela norma NBR 8890 (ABNT, 2020), que especifica requisitos para tubos de concreto para águas pluviais e esgoto. Esta norma, desenvolvida em paralelo com as especificações para fibras de aço, permite a utilização de fibras de aço apenas para reforçar os tubos, além do reforço convencional com vergalhões de aço para concreto armado. É de

salientar que se trata da primeira norma brasileira a abordar a aplicação de concreto reforçado com fibras.

Para o uso específico de fibras, a norma NBR 8890 (ABNT, 2020) implementou alterações no sistema principal de qualificação dos tubos com fibras, reformulando o procedimento de ensaio de compressão diametral. No caso das fibras de aço, o novo procedimento de ensaio inclui uma rotina de carregamento, descarregamento e recarregamento do tubo, permitindo a avaliação de sua capacidade resistente após a formação de fissuras. A realização do ensaio de compressão diametral é essencial para a garantia da qualidade do componente. (Figueiredo; Chama Neto, 2007).

Segundo Figueiredo (2011), a realização do ensaio de compressão diametral é essencial para a garantia da qualidade do componente, através deste ensaio é possível realizar a determinação da carga máxima pós-fissuração, o que é um parâmetro fundamental para a otimização do sistema de reforço com fibras para os tubos. (ver Figura 6).

Figura 6 - Tubo de CRF sendo submetido ao ensaio de compressão diametral.



Fonte: Figueiredo; Chama Neto, 2007.

## 2.5 Outros Tipos de Fibras Aplicado ao Concreto

### 2.5.1 Fibras de Polipropileno

Além das fibras de aço, o mercado oferece várias outras opções de fibras para a mistura de concreto. Entre as mais comuns estão: Fibra de polipropileno e vidro.

De acordo com Figueiredo (2005), as Fibras de Polipropileno são fornecidas em duas formas, as microfibras e macrofibras (ver Figura 7). As microfibras embora não tenham uma função estrutural, elas são eficazes na redução da retração plástica do concreto nos estágios iniciais, especialmente durante o processo de cura. Por outro lado, as macrofibras foram desenvolvidas para oferecer ao concreto uma resistência aprimorada ao impacto e à fadiga em

comparação com o concreto convencional, assegurando um controle eficiente da formação de fissuras.

Figura 7 - Tipos de fibras de polipropileno.



Fonte: Figueiredo, 2005.

O polipropileno é um polímero sintético derivado do propileno, notável por sua baixa massa específica, a menor entre os termoplásticos, e por sua resistência à corrosão (Isaias, 2007). Este material é altamente versátil e amplamente utilizado na produção de recipientes plásticos, estofados e até roupas, além de ser reconhecido por sua reciclabilidade. Devido ao seu baixo peso, os produtos de polipropileno são leves e econômicos. No caso do concreto, a adição de fibras de polipropileno reduz o peso total do material em comparação com outros tipos de reforço. Em contraste as fibras de aço que aumentam o peso do elemento estrutural quando incorporadas ao concreto

### 2.5.2 Fibras de Vidro

Conforme Carvalho (1993), a fibra de vidro possui matéria-prima composta principalmente pela sílica em forma de areia, o componente básico para qualquer vidro, cerca de 50%. Os outros ingredientes são os boratos e pequenas quantidades de especialidades químicas.

Godinho (2014) comenta que durante a manufatura, cada fibra é submetida a um revestimento químico (sizing) que protege e lubrifica individualmente os filamentos, melhorando a resistência à abrasão e garantindo a integridade do feixe. Sem esse tratamento superficial, as fibras não poderiam atuar efetivamente como material de reforço. Além disso, o revestimento superficial ajuda a tornar as fibras compatíveis com a matriz que será reforçada. Por fim, as bobinas são aquecidas para secar o revestimento químico.

Figura 8 - Fibra de vidro picada



Fonte: Bonifácio; Godinho, 2014.

Os tipos de fibras são classificados de acordo com suas propriedades específicas.

Tipo **E**, possui baixa condutividade elétrica;

Tipo **S**, possui grande resistência mecânica;

Tipo **C**, possui grande resistência química;

Tipo **M**, possui alta elasticidade;

Tipo **A**, possui alta composição de metais alcalinos;

Tipo **D**, possui baixa constante dielétrica;

Tipo **AR**, possui grande resistência alcalina."

Segundo Cateb (2011), na construção civil, a fibra de vidro é frequentemente considerada mais vantajosa em comparação com outras opções devido à sua alta resistência à tração, elevado módulo de elasticidade e baixo custo de produção.

## 2.6 Recomendações Normativas para CRF

As diversas aplicações e usos do concreto reforçado com fibras (CRF) exigem metodologias de teste adequadas para garantir eficiência, segurança e qualidade, bem como assegurar um desempenho satisfatório ao longo de sua vida útil. Para isso, as metodologias de teste são frequentemente padronizadas por normas internacionais, como as normas europeias (EN) e da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM). No Brasil, as práticas recentes foram padronizadas pelas seguintes normas:

- NBR 16940 (ABNT, 2021): Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão. Método de ensaio;

- NBR 15530 (ABNT, 2019) Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio;
- NBR 16938 (ABNT, 2021): Concreto reforçado com fibras – Controle de qualidade;
- Norma Mercosul (NM 55, 1996): Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos.

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

A referida norma estabelece o método para avaliar o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras sob flexão, incluindo a determinação das resistências à tração na flexão, como o limite de proporcionalidade e as resistências residuais.

Além disso, a norma determina que, durante o controle tecnológico do Concreto Reforçado com Fibras (CRF), que inclui a avaliação do concreto fresco, os ensaios de consistência devem ser realizados em todos os caminhões, no caso de concreto dosado em central. Quando as fibras são adicionadas ao concreto na usina, o controle do teor de fibras no concreto fresco deve ser realizado por amostragem total, abrangendo todos os caminhões, conforme estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2022).

A norma define os seguintes termos e conceitos:

- **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 dentro do intervalo de 0 a 0,05 mm, assumido em uma seção não fissurada (FL).
- **Abertura do Entalhe (CMOD):** Medida linear da abertura do entalhe na face inferior do corpo de prova.
- **Resistência Residual à Tração na Flexão (FR):** Tensão na extremidade superior do entalhe calculada a partir de uma carga aplicada no meio do vão, para o valor de CMOD no intervalo de 0,05 mm a 4 mm.

A máquina de ensaio para tração na flexão deve atender aos requisitos da ABNT NBR ISO 7500-1, classe 1 ou superior, e operar com controle fechado da velocidade, mantendo uma taxa constante de abertura do entalhe ou deslocamento vertical do corpo de prova ( $\delta$ ). O

equipamento deve ter rigidez e capacidade de resposta adequadas para evitar instabilidades na curva carga-CMOD ou carga-deslocamento ( $\delta$ ).

Duas configurações de controle podem ser utilizadas: medição da abertura do entalhe ou medição do deslocamento vertical do corpo de prova ( $\delta$ ). Para corpos de prova com altura de 100 mm, deve-se adotar apenas a medição da abertura do entalhe.

Se o equipamento de ensaio controlar a taxa de aumento do deslocamento vertical do corpo de prova, o procedimento deve ser ajustado para transformar os parâmetros relacionados ao CMOD em parâmetros de deslocamento vertical. Caso a fissura se inicie fora do entalhe durante o ensaio, o corpo de prova deve ser descartado.

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

Esta norma especifica o método para realizar ensaios de tração por flexão em corpos de prova de concreto, utilizando o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas aplicadas nos terços do vão. As orientações estabelecidas para o ensaio de corpos de prova moldados também se aplicam, quando apropriado, aos testemunhos extraídos de concreto de acordo com a NBR 7680 (ABNT, 2015).

É importante destacar que a NBR 5739 (ABNT, 2018) estabelece que a escala de força escolhida para o ensaio deve ser adequada para que a ruptura do corpo de prova ocorra dentro da faixa de calibração da máquina. Portanto, é essencial verificar se a escala adotada para a realização deste ensaio atende a essa exigência.

A norma destaca algumas exigências para realizar a utilização da máquina de ensaios:

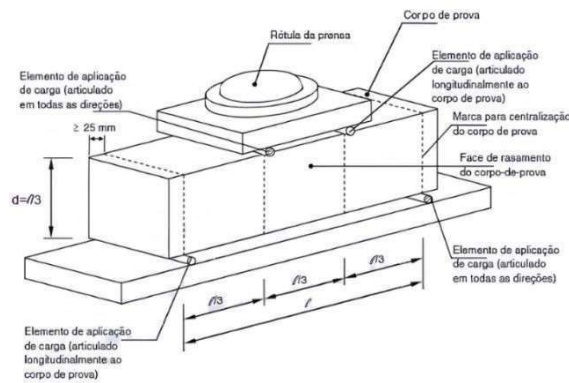
- a) a distância entre apoios e pontos de aplicação de força deve permanecer constante durante o ensaio;
- b) a força deve ser aplicada normalmente à superfície do corpo de prova, evitando excentricidade;
- c) a direção das reações deve ser mantida paralela à direção da força durante todo o ensaio;
- d) a força deve ser aplicada de forma gradual e uniforme, evitando choques.

O ensaio de quatro pontos é um método amplamente utilizado para a caracterização do comportamento à flexão do concreto, permitindo uma análise mais precisa da resistência e da

ductilidade do material. Diferentemente do ensaio de três pontos, essa metodologia distribui a carga aplicada de maneira mais uniforme, reduzindo a concentração de tensões no ponto central do corpo de prova e promovendo um estado de tensões mais homogêneo na região entre os pontos de aplicação da carga. Dessa forma, os resultados obtidos refletem de maneira mais fiel as propriedades mecânicas do concreto em condições de flexão.

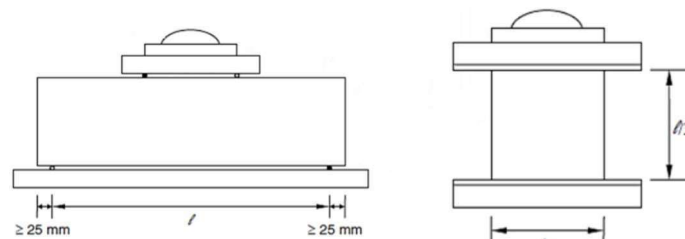
O procedimento consiste na aplicação de forças em dois pontos equidistantes ao longo da viga de concreto, enquanto os apoios localizados nas extremidades garantem a estabilidade da peça. As Figuras 9 e 10 ilustram o dispositivo auxiliar, projetado para acoplar-se a máquinas sem essa funcionalidade, garantindo a correta aplicação das forças e a precisão dos resultados.

Figura 9 - Dispositivo de ensaio (perspectiva).



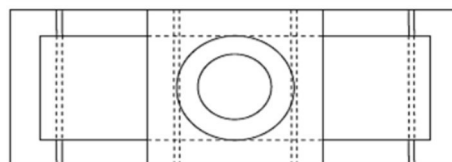
Fonte: NBR 12142 (ABNT, 2010).

Figura 10 - Dispositivo de ensaio de flexão de quatro pontos



a) Vista frontal

b) Vista lateral



c) Vista superior

Fonte: NBR 12142 (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.

### 2.6.2.1 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 11), 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:

$f_{ct,f}$  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);

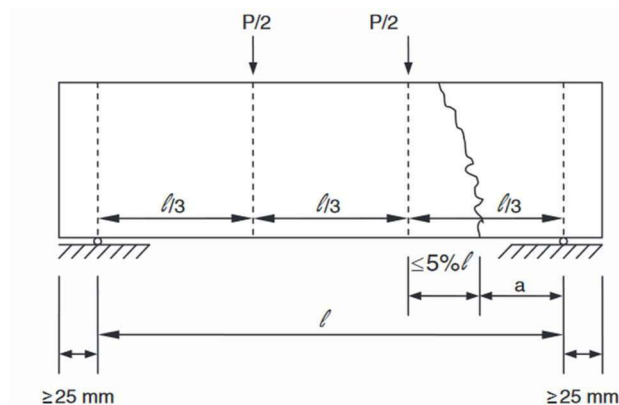
$l$  é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);

$b$  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).

Figura 11 - Ruptura fora do terço médio.



Fonte: NBR 12142 (ABNT, 2010).

## 2.7 Ensaio em Placas

Os ensaios em placas de concreto reforçadas com fibras de aço são amplamente aplicados para avaliar o comportamento de pavimentos, lajes e fundações, onde a resistência à

fissuração, à fadiga e à deformação pós-fissuração são características críticas. Este tipo de ensaio permite medir o desempenho estrutural sob diferentes tipos de carga, como cargas concentradas, repetitivas ou de impacto, simulando as condições reais em obras de infraestrutura.

Segundo Aveston *et al.* (1971), citados por Bentur & Mindess (1990), quando a quantidade de fibras excede um valor crítico, elas conseguem suportar tensões superiores àquelas que causariam a fissuração da matriz. Esse fenômeno é fundamental para o aumento da tenacidade e da resistência residual do concreto, garantindo um melhor desempenho estrutural mesmo após a formação de fissuras.

Em estruturas como pavimentos e lajes, que estão sujeitas a cargas repetitivas e impactos, como o tráfego rodoviário intenso ou vibrações de equipamentos pesados, o concreto tradicional pode apresentar fissuração precoce e perda de desempenho ao longo do tempo. A adição de fibras de aço aumenta a vida útil da estrutura e reduz a necessidade de reparos frequentes.

### 2.7.1 Tipos de ensaios realizados em Placas de Concreto Reforçado em Fibras de Aço

O concreto reforçado com fibras de aço tem sido amplamente estudado devido à sua capacidade de melhorar o desempenho estrutural em diferentes condições de carregamento. Segundo Leite & De Castro (2020), a incorporação de fibras de aço na matriz cimentícia promove maior resistência à fissuração e melhora as propriedades mecânicas do material. Os principais ensaios aplicados a este tipo de concreto incluem:

- Ensaio de Compressão com Cargas Concentradas

Os ensaios de compressão são fundamentais para avaliar a capacidade de suporte e a deformabilidade das placas de concreto reforçadas com fibras de aço. Estudos demonstram que as fibras aumentam a ductilidade do material, reduzindo a propagação de fissuras e proporcionando uma resposta estrutural mais eficiente (Leite & De Castro, 2020). Esses ensaios são especialmente relevantes para estruturas submetidas a cargas localizadas, como pavimentos e fundações.

- Ensaio de Flexão

A flexão é um dos modos de falha mais comuns em estruturas de concreto, especialmente em lajes e pavimentos. Conforme destacado por Almeida Filho *et al.* (2018), "a

adição de fibras de aço ao concreto promove um aumento significativo na tenacidade e na capacidade de absorção de energia do material, especialmente após a fissuração". Esse comportamento melhora a resistência pós-fissuração e a ductilidade do concreto, permitindo que a estrutura continue suportando cargas mesmo após o surgimento de trincas, o que resulta em maior segurança e durabilidade.

- Ensaio de Fadiga

Estruturas submetidas a carregamentos repetitivos, como pavimentos rodoviários e aeroportuários, são suscetíveis à fadiga. De acordo com Souza et al. (2019), "as fibras de aço desempenham um papel crucial na dissipação de tensões internas, retardando a propagação de fissuras e prolongando a vida útil da estrutura". Esse efeito reforça a durabilidade do concreto e sua capacidade de resistir a ciclos de carga elevados, garantindo maior segurança e desempenho ao longo do tempo.

- Ensaio de Impacto

Os ensaios de impacto são empregados para avaliar a resistência do concreto reforçado com fibras de aço a cargas dinâmicas, como choques e golpes. Conforme destacado por Silva et al. (2019), "a adição de fibras melhora significativamente a capacidade de absorção de energia do material, reduzindo a gravidade das fissuras e aumentando sua durabilidade". Essa característica é essencial para estruturas expostas a tráfego pesado e condições severas, garantindo maior segurança e desempenho ao longo do tempo.

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia deste estudo foi desenvolvida a partir de um programa experimental detalhado, cujo foco foi analisar o comportamento mecânico de vinte e uma (21) placas de concreto reforçadas com fibras de aço (CRFA) incorporadas à matriz do concreto. As fibras foram distribuídas de maneira homogênea durante o processo de dosagem que ocorreu de forma manual na betoneira.

As placas biapoiadas, foram submetidas a ensaios mecânicos em condições controladas, configuradas para garantir uma distribuição uniforme de esforços durante os ensaios. O sistema de ensaio foi realizado utilizando o método de flexão em quatro pontos, uma abordagem amplamente reconhecida por sua eficácia na avaliação da resistência à tração por flexão direta em elementos estruturais. Esse método permite a identificação precisa do comportamento pós-fissuração e da capacidade de redistribuição de tensões no material. Ressalta-se que todo o processo seguiu rigorosamente os critérios e recomendações estabelecidos pela norma NBR 12142 (ABNT, 2010), garantindo a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Além disso, a metodologia incluiu o controle rigoroso das condições experimentais, como a homogeneidade do concreto, a proporção de fibras incorporadas e a preparação das superfícies de apoio e de aplicação de carga.

#### **3.1 Características das placas de concreto reforçados com fibras de aço CRFA**

Neste experimento, foram avaliadas 21 (vinte e uma) placas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) contendo diferentes teores de fibras. A seção transversal das placas foi de 150 x 500 mm<sup>2</sup> e altura de 25 mm. Foram utilizados três tipos de fibras de aço, Wiremix W40, Dramix 3d 45/50 B1 e 3D Dramix 65/60 BG. Com base nessas condições, as placas foram classificadas em três grupos em função da porcentagem de fibras na matriz, sendo 03 amostras de referência, PC-Ref (0% de fibras, grupo de referência), e 03 amostras para cada teor e tipo de fibra, variando de 1,0% e 1,5% de fibras por m<sup>3</sup> de concreto. As Tabelas a seguir, mostram o resumo das variáveis. O objetivo dessa variação no tipo foi em poder identificar o teor de fibras que proporciona o melhor desempenho mecânico à matriz do concreto.

Tabela 1 - Descrição das amostras das placas de referência.

<b>CARACTERÍSTICAS DAS PLACAS DE REFERÊNCIA</b>					
Amostras		<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	vol/fibra (%)
<b>GR I</b>	<b>PC-REF</b>	25	150	500	0
	<b>PC-REF</b>				
	<b>PC-REF</b>				

\*GR (Grupo de Referência). \*PC-REF (Placa-Referência)

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Tabela 2 - Descrição das amostras das placas TP1.

<b>CARACTERÍSTICAS DAS PLACAS FIBRAS DE AÇO TIPO 1 – WIREMIX W40</b>					
Amostras		<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	vol/fibra (%)
<b>GR II</b>	<b>PC1 – 1,0</b>	25	150	500	1
	<b>PC1 – 1,0</b>				
	<b>PC1 – 1,0</b>				
<b>GR III</b>	<b>PC1 - 1,50</b>	25	150	500	1,5
	<b>PC1 - 1,50</b>				
	<b>PC1 - 1,50</b>				

\*GR (Grupo de Referência). \*PC1 (Placa 1)

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Tabela 3 - Descrição das amostras das placas TP2.

<b>CARACTERÍSTICAS DAS PLACAS FIBRAS DE AÇO TIPO 2 - DRAMIX 3d 45/50 BI</b>					
Amostras		<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	vol/fibra (%)
<b>GR II</b>	<b>PC2 – 1,0</b>	25	150	500	1
	<b>PC2 – 1,0</b>				
	<b>PC2 – 1,0</b>				
<b>GR III</b>	<b>PC2 - 1,50</b>	25	150	500	1,5
	<b>PC2 - 1,50</b>				
	<b>PC2 - 1,50</b>				

\*GR (Grupo de Referência). \*PC2 (Placa 2)

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Tabela 4 - Descrição das amostras das placas TP3.

<b>CARACTERÍSTICAS DAS PLACAS – FIBRAS DE AÇO TIPO 3 - 3D Dramix 65/60 BG</b>					
Amostras		<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	vol/fibra (%)
<b>GR II</b>	<b>PC3 - 1,0</b>	25	150	500	1
	<b>PC3 - 1,0</b>				
	<b>PC3 - 1,0</b>				
<b>GR III</b>	<b>PC3- 1,50</b>	25	150	500	1,5
	<b>PC3 - 1,50</b>				
	<b>PC3 - 1,50</b>				

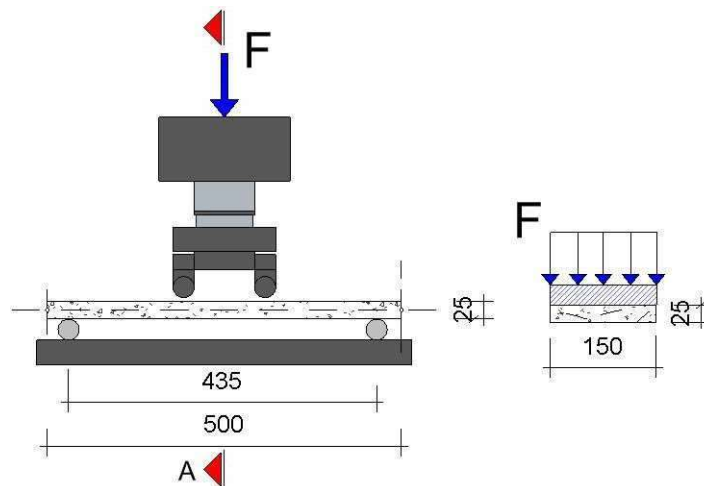
\*GR (Grupo de Referência). \*PC3 (Placa 3)

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

### 3.2 Sistema de ensaio

A configuração experimental foi projetada para simular as condições de contorno e carregamento apresentadas na Figura 12. Nesse contexto, foram adotados apoios simples (biapoiados), os quais estabeleceram o contorno das placas. Esse arranjo permitiu a aplicação de tração na flexão direta das placas, de acordo com a condição de carregamento estabelecida pelas diretrizes da NBR 12142 (ABNT, 2010). Além disso, os métodos de análise seguiram as recomendações de autores como Mehta & Monteiro (2006), que discutem a importância da simulação fiel das condições de carregamento para a avaliação do desempenho do concreto reforçado com fibras.

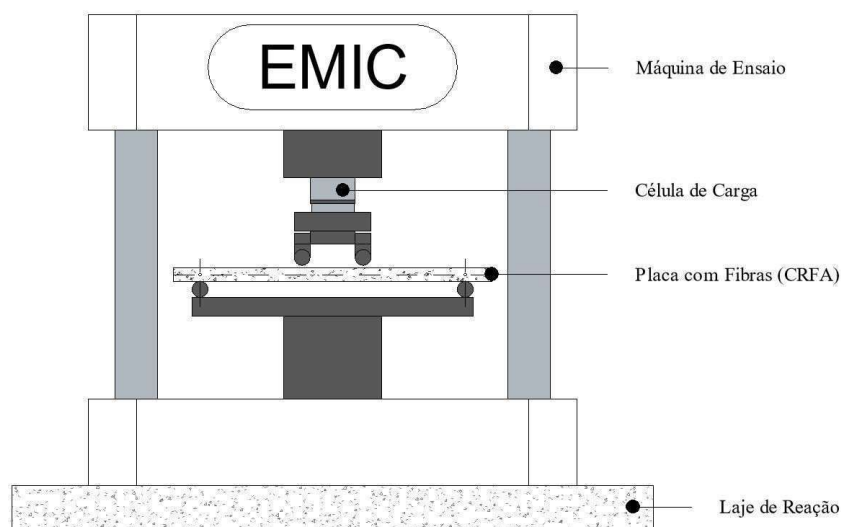
Figura 12 - Sistema de ensaio de 4 pontos para as placas (Unidade de mensuração em milímetros).



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

O sistema de ensaio utilizado é detalhadamente ilustrado na Figura 13. A aplicação da carga foi realizada por meio de um cilindro hidráulico acoplado a uma máquina de ensaio universal da marca EMIC, cuja capacidade máxima de carga é de 2000 kN. Esse equipamento permite um controle preciso da força aplicada, garantindo a simulação realista das condições de carregamento exigidas para a avaliação do comportamento do material sob diferentes tipos de esforços. A máquina universal EMIC foi escolhida por apresentar alta precisão e capacidade de gerar forças de compressão e tração, essenciais para a obtenção de resultados confiáveis durante os ensaios mecânicos.

Figura 13 – Montagem do Sistema de ensaio de 4 pontos das placas.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

### 3.3 Caracterização dos materiais

#### 3.3.1 Dosagem

As etapas subsequentes foram conduzidas com a finalidade de otimizar a caracterização dos materiais utilizados no experimento. Inicialmente, realizou-se a caracterização dos materiais. Em seguida, procedeu-se à confecção das formas para as placas, tomando como referência o traço previamente calculado para concreto de classe C30, correspondente a resistência característica à compressão de 30 MPa. Posteriormente, efetuou-se a concretagem das placas, assegurando a correta moldagem. Por fim, foram realizados os ensaios mecânicos para avaliar o desempenho das peças produzidas, conforme os parâmetros estabelecidos.

O cimento empregado na fabricação das placas experimentais foi do tipo Cimento Portland CP II Z-32, um material amplamente utilizado na construção civil devido às suas propriedades cimentantes e adição de material pozolânico. Esse cimento, produzido pela empresa MIZU (ver Figura 14), foi adquirido no comércio local da cidade de Itaituba-PA, garantindo fácil acesso e disponibilidade.

Figura 14 - Caracterização do Cimento Portland CP II Z 32.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

No que tange ao agregado miúdo (areia), o ensaio de granulometria foi realizado para classificar o material como areia média, conforme a NBR 52 (NM, 2009), com retenção significativa nas peneiras de 1,2 mm, 0,6 mm e 0,3 mm. Após a caracterização granulométrica, a areia foi submetida a um processo de secagem natural ao sol (ver Figura 15). A escolha desse processo de secagem e caracterização baseou-se na intenção de refletir da forma mais fiel possível as condições reais encontradas nos canteiros de obras.

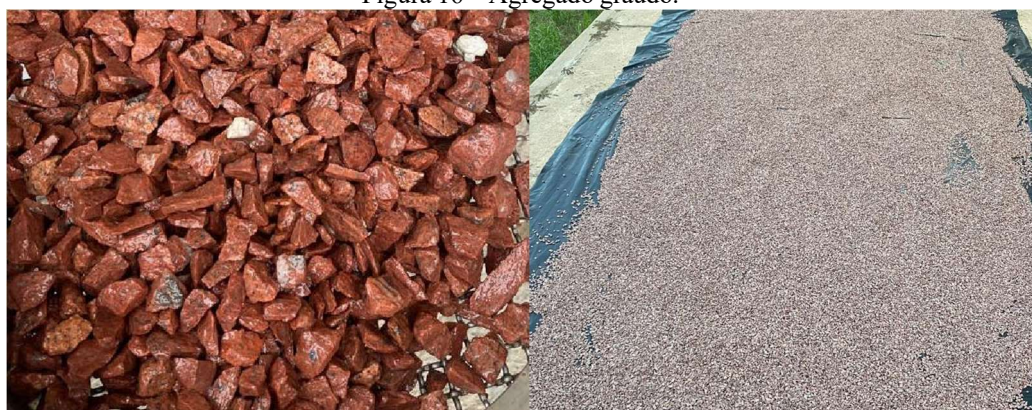
Figura 15 - Agregado miúdo.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

O agregado graúdo utilizado foi a brita nº 0, proveniente da região do município de Itaituba/PA. Inicialmente, o material foi submetido a uma caracterização granulométrica por peneiramento, sendo classificado dentro da faixa de partículas retidas entre as peneiras de 4,8 mm e 9,5 mm. Após essa etapa, a brita passou por um processo de lavagem para a remoção de impurezas e submetido ao processo de secagem natural ao sol (Ver Figura 16).

Figura 16 – Agregado graúdo.



a) lavagem da brita

b) Secagem *in natura*

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

A Tabela 5 apresenta a composição dos materiais utilizados na produção tanto do concreto de referência quanto do concreto reforçado com fibras de aço. Nessa tabela, é possível verificar o traço adotado no estudo, permitindo uma análise comparativa entre as duas misturas em termos de dosagem para cada amostra.

Tabela 5 Consumo de materiais utilizados na fabricação do CRFA.

Consumo (kg/m <sup>3</sup> ) Materiais	Placas CRFA- TIPO 1,2,3.		
	Ref 0%	Placa - 1,0%	Placa - 1,5
Cimento Portlando CII-Z-32	366,49	366,49	366,49
Areia média	697,09	697,09	697,09
Brita	1021,87	1021,87	1021,87
Água	212,56	212,56	212,56
Fibra	0%	1,00%	1,50%
Aditivo	-	-	-

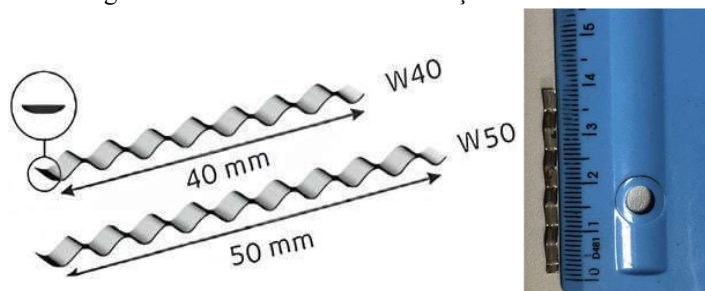
Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Conforme comentado antes, foram utilizados três tipos distintos de fibras de aço, cada uma com características específicas relacionadas ao fator de forma e propriedades mecânicas. Além disso, foram adotados dois diferentes teores de fibras na composição do material, possibilitando uma análise comparativa de seu desempenho e influência nas propriedades finais das placas experimentais. Para facilitar a identificação e a categorização no estudo, as fibras foram denominadas como Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3.

A fibra de aço Tipo 1 utilizada neste estudo foi a Wiremix W40, fabricada pela empresa DRAMIX, atendendo aos requisitos da norma NBR 15530 (ABNT, 2019). Essa fibra pertence à categoria "C", caracterizada por sua superfície corrugada, e é classificada como Classe III, de

formato senoidal, com comprimento de 40 mm e largura de 2,00 - 2,80 mm. Além disso, é fornecida em forma de fibras soltas, facilitando sua dispersão homogênea na matriz cimentícia e contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas do compósito.

Figura 17 – Geometria da fibra de aço Wiremix W40.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

As propriedades físicas da fibra estão de acordo com NBR 15530 (ABNT, 2019).

Tipo de produto: Wiremix W40

Forma: Corrugado

Fibras coladas ou soltas: soltas

Comprimento:  $40 \pm 3$  mm

Diâmetro: 0,75 – 1,45

Factor de forma: 28-53

Resistência à tração:  $\geq 700$

Efeito na consistência: 8

Efeito na resistência do concreto: 35

Modulo de elasticidade: 200

A fibra de aço Tipo 2 utilizada neste estudo foi a 3D DRAMIX 45/50 BN, fornecida pela empresa DRAMIX e fabricada em conformidade com os requisitos da norma NBR 15530 (ABNT, 2019). Essa fibra é do tipo *hooked end*, caracterizada por suas extremidades ancoradas, o que melhora a aderência à matriz cimentícia. Com um comprimento de 50 mm e um diâmetro de 1,05 mm, é disponibilizada em forma de fibras soltas.

Figura 18 – Geometria das fibras de aço Tipo 2 – 3D Dramix 45/50 BN.



**Comprimento 50 mm    Diâmetro 1,05 mm**

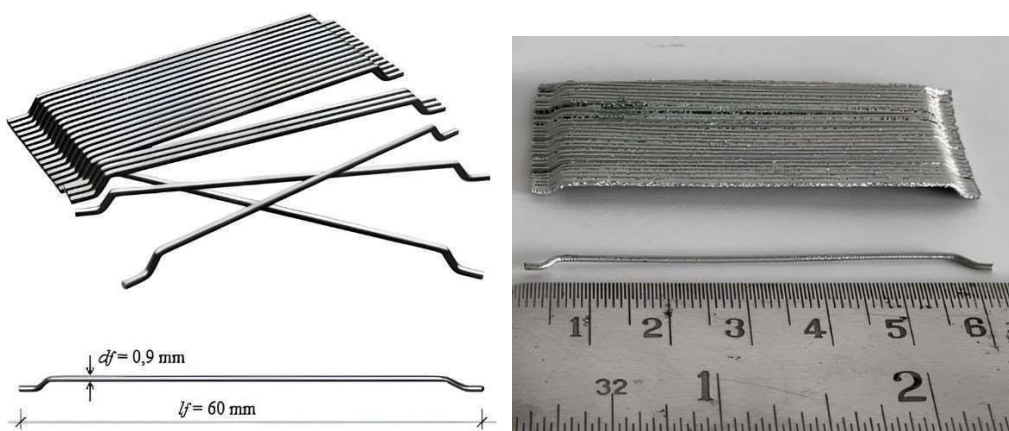
Fonte: Dramix® – Março 2009.

As propriedades da fibra estão de acordo com a norma NBR 15530 (ABNT, 2019) – Fibras de Aço para Concreto.

Material: aço  
 Comprimento: 50 mm  
 Diâmetro: 1,05 mm  
 Resistência à tração: 1,115 (N/mm<sup>2</sup>)  
 Módulo de Young: 210.000 (N/mm<sup>2</sup>)  
 Fator de forma(l/d): 45

A fibra de aço Tipo 3 empregada foi a 3D Dramix 65/60 BG, fabricada pela empresa DRAMIX, em conformidade com a norma ASTM A820 (2016). Essa fibra, do tipo fim com gancho (*hooked end*), é fornecida em feixes colados, contendo 30 fibras por pente, com comprimento  $l_f = 60$  mm e um diâmetro de  $d_f = 0,9$  mm, resultando em um  $\lambda$  de 65. Além disso, possui resistência à tração de 1,16 MPa e módulo de elasticidade de aproximadamente 210 GPa, conforme especificado pelo fabricante.

Figura 19 - Geometria e propriedades das fibras de aço 3D Dramix 65/60 BG.



Fonte: Dramix® – Março 2009.

### 3.3.2 Preparação das placas com Fibras de aço

Após a conclusão da etapa de caracterização dos materiais, deu-se início à fabricação das placas. O processo começou com a confecção das formas, conforme ilustrado na Figura 19. Para esse fim, foi empregado madeirite com acabamento deslizante, escolhido estrategicamente para facilitar a remoção das placas após a cura e assegurar um acabamento superficial uniforme e de alta qualidade, contribuindo para a precisão dimensional e a integridade estrutural das peças moldadas.

Figura 20 - Preparação das formas das placas pré-moldadas.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Antes do início do processo de concretagem das placas, foram realizadas etapas preparatórias essenciais para garantir a qualidade e a organização do experimento. As superfícies das formas foram tratadas com desmoldantes para facilitar a remoção das placas após a cura, e cada unidade foi devidamente identificada conforme seu respectivo grupo. Em seguida, procedeu-se à fabricação do concreto de maneira manual, utilizando uma betoneira (ver Figura 20). Esse processo foi repetido em sete ciclos distintos, ajustando-se a dosagem de fibras de acordo com o planejamento experimental. As proporções variaram entre 0%, 1,0% e 1,5% de fibra por metro cúbico de concreto, sendo essa variação aplicada aos três tipos de fibras utilizados no estudo (Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3).

Figura 21 – Preparação do concreto reforçado com fibras de aço na betoneira.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Para assegurar a qualidade e a uniformidade da mistura, a produção do concreto foi iniciada sem a adição de fibras, permitindo uma melhor homogeneização dos materiais e prevenindo a formação de aglomerados indesejados. Posteriormente, as fibras foram incorporadas gradualmente ao composto, garantindo uma dispersão mais eficiente e um

envolvimento adequado na matriz cimentícia. Esse procedimento contribui para a melhoria das propriedades mecânicas do concreto e otimiza sua trabalhabilidade (ver Figura 21).

A concretagem das placas iniciou-se com a moldagem das amostras de referência, sem adição de fibras (0%), avançando posteriormente para as placas contendo fibras dos tipos 1, 2 e 3, em dosagens de 1,0% e 1,50%.

O adensamento do concreto foi conduzido manualmente por meio de leves batidas nas fôrmas, assegurando a eliminação de bolhas de ar e a distribuição homogênea da mistura. Esse método evita falhas internas que poderiam comprometer a resistência e a durabilidade das placas. A Figura 21 ilustra o procedimento de concretagem das placas.

Figura 22 - Concreto sem adição de fibras.



a) Concreto sem adição de fibra

b) Placas pré-moldadas 0% de fibra

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Transcorrido um período de 24 horas após a concretagem das placas, teve início o processo de cura, que se estendeu por duas semanas. Durante esse tempo, a umidificação das placas foi realizada manualmente, pelo menos duas vezes ao dia, garantindo a hidratação adequada do concreto, e prevenindo o surgimento de fissuras de retração, (Figura 22).

Figura 23 - Processo de cura das placas pré-moldadas.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Após o período de cura de 28 dias, conforme recomendado pela NBR 14931 (ABNT, 2023), iniciou-se o processo de desforma das placas, garantindo que o concreto atingisse a resistência adequada para a remoção das formas. Esse procedimento foi realizado com cautela para evitar danos às superfícies das peças e garantir a integridade estrutural do material.

Figura 24 – Peças pré-moldadas após desformar



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

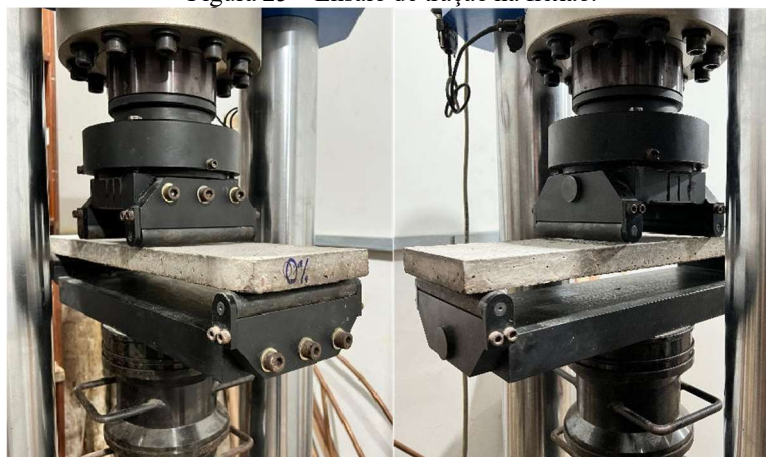
## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Resistência mecânica à tração na flexão

#### 4.1.1 Placas de referência (sem adição de fibras).

A obtenção dos resultados ocorreu por meio do ensaio de resistência à tração na flexão, utilizando o método de quatro pontos. Para assegurar a precisão dos dados, foram realizadas a calibração do equipamento e a configuração da leitura automática da carga, antes do início dos testes. A Figura 25 mostra a preparação para o início dos ensaios.

Figura 25 – Ensaio de tração na flexão.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

É importante ressaltar que o posicionamento das placas foi realizado com precisão, garantindo a correta distribuição das distâncias eixo a eixo no equipamento de apoio. Esse procedimento foi essencial para assegurar que a flexão máxima ocorresse na região central das placas, permitindo a exploração total de sua capacidade à tração ao longo dos ensaios. (Ver Figura 25).

O experimento teve início com os testes nas placas de referência, cuja matriz de concreto não continha adição de fibras (0% de fibras). Para cada grupo experimental, foram analisadas três placas, permitindo uma avaliação aprofundada do comportamento mecânico do material sob carregamento. Através da Figura 26, é possível visualizar a ruína da placa de referência, e os resultados dos ensaios podem ser visto na Tabela 6.

Figura 26 – Placa de referência 0% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Tabela 6 – Resultado do ensaio de tração sem adição de fibras 0,0%.

<i>Placas</i>	<i>Carga (N)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>B (mm)</i>	<i>D (mm)</i>	<i>f<sub>ct,f</sub> (MPa)</i>
<b>Ref 0,0%</b>	294,199	450	150	25	1,412
<b>Ref 0,0%</b>	882,598	450	150	25	4,236
<b>Ref 0,0%</b>	<b>0,0</b>	450	150	25	<b>0,000</b>
<b>Média</b>	1,883 MPa				

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Recorda-se que para obtenção da tensão  $f_{ct,f}$  tomou-se como referência a Equação 1, uma vez que a fratura das placas ocorreu predominantemente na seção central, conforme ilustrado na Figura 26. Durante os ensaios, verificou-se que o concreto apresentou um mecanismo de ruptura abrupta e frágil, comportamento já previsto devido à sua baixa capacidade de resistência à tração, que equivale, em média, a cerca de 10% da resistência à compressão. Esse padrão de falha foi observado de forma consistente em todas as amostras testadas, resultando em um valor médio de resistência à tração na flexão de 1,883 MPa. No entanto, durante o ensaio, ocorreu uma falha na leitura da ruptura de uma das peças, o que exigiu uma reavaliação dos dados para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.

Vale ressaltar, que devido a baixa resistência apresentada nas amostras de referência, houve a dificuldade de leitura do próprio equipamento, apesar de sensível sua leitura, o material exibiu um comportamento sem curvas bem definidas da relação tensão x deformação, bem características de material frágil. Apesar de trivial essa informação, o resultado justifica a proposta do trabalho em melhorar as propriedades de resistência à tração do concreto.

Figura 27 – Placa 0,0% fibra com ruptura brusca do concreto.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

#### 4.1.2 Placas Tipo 1 - Wiremix W40 (1,0% de Fibras)

Para as placas do Tipo 1 (PC1), cuja composição continha 1,0% de fibras em relação ao volume total de concreto, os ensaios foram conduzidos seguindo rigorosamente os mesmos procedimentos descritos anteriormente e ilustrados na Figura 27. Os resultados obtidos a partir desses ensaios são apresentados detalhadamente na Tabela 7, evidenciando o impacto da adição de fibras no comportamento mecânico das placas.

Tabela 7 - Resultado ensaio de tração PC1 1,0%.

Placas	Carga (N)	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>f<sub>ct</sub></i> , <i>f</i> (MPa)
PC1 - 1,0%	939,45	450	150	25	4,509
PC1 - 1,0%	939,45	450	150	25	4,509
PC1 - 1,0%	0	450	150	25	0,000
Média	4,509 MPa				

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Os ensaios realizados nas placas com adição de 1,0% de fibras revelaram um desempenho superior em resistência à tração na flexão em comparação ao concreto sem fibras, o que já era esperado. Esse resultado demonstra de forma positiva que a incorporação de fibras de aço contribuiu significativamente para o reforço das propriedades do concreto sob tração, além de melhorar sua tenacidade e ductilidade. Durante o procedimento, houve uma nova falha na leitura do equipamento de ruptura para uma das peças, o que resultou na ausência de registro de carga para uma das três amostras testadas, tornando necessária uma reavaliação dos dados para assegurar a precisão dos resultados.

Ressalta-se que o comportamento frágil apresentado nas amostras sem adição de fibras foi oposto para as amostras do tipo 1, garantindo, boa relação da fibra na matriz do concreto,

saindo de um comportamento frágil para um comportamento dúctil em fratura total da peça, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Placas de concreto reforçadas com fibras Tipo 1 – Wiremix W40



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

#### 4.1.3 Placas Tipo 1 - Wiremix W40 (1,5% de Fibras)

Para as placas PC1 com 1,5% de fibras, os ensaios foram conduzidos seguindo os mesmos procedimentos adotados anteriormente, garantindo a uniformidade na coleta de dados. Os resultados obtidos estão detalhados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado ensaio de tração PC1 1,5%.

Placas	Carga (N)	$l$	$b$	$d$	$f_{ct},f$ (MPa)
PC1 - 1,5%	1195,66	450	150	25	5,739
PC1 - 1,5%	1195,66	450	150	25	5,739
PC1 - 1,5%	1195,66	450	150	25	5,739
<b>Média</b>	<b>5,739 MPa</b>				

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Os ensaios realizados nas placas PC1 com 1,5% de fibras mostraram um aumento de resistência à tração na flexão em comparação com as placas do mesmo tipo contendo 1,0% de fibras. Esse resultado indica que, nesse caso específico, o maior teor de fibras contribuiu para uma melhor distribuição das tensões e um desempenho mecânico superior. No entanto, esse efeito pode estar relacionado às características particulares dessa composição de fibras, não sendo necessariamente uma tendência universal para todas as misturas com teores mais elevados de fibra.

O padrão de fissuração das peças pode ser visto na Figura 29. Observa-se que houve um padrão entre as 03 amostras com microfissuras na região tracionada, sem ruptura total das peças.

Figura 29 – Qualidade do concreto placas 1,5%.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

É possível observar que, com a adição de fibras de aço, o concreto apresentou um comportamento mais dúctil. As fibras desempenharam um papel fundamental na contenção da propagação das fissuras, atuando como pontes que redistribuem as tensões ao longo da matriz. Esse mecanismo resultou em uma ruptura mais controlada e gradual, diferentemente do concreto sem fibras, que resultou em ruptura de forma brusca.

#### 4.1.4 Placas Tipo 2 - 3D DRAMIX 45/50 BN, 1,0% de fibras

Para o grupo de placas PC2 com 1,0% de fibras (ver Figura 30), os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9. A análise dos dados revelou que a resistência à tração na flexão das placas PC2 foi superior à das placas PC1 com a mesma proporção de fibras (1,0%). Esse desempenho diferenciado pode ser atribuído às distintas características das fibras utilizadas em cada tipo de placa. Uma vez que, as propriedades mecânicas das fibras, como resistência à tração e módulo de elasticidade, afetam a forma como elas interagem com os demais componentes do concreto e contribuem para a dissipação das tensões aplicadas.

Essas divergências ressaltam a importância de uma avaliação criteriosa na seleção e incorporação de fibras, garantindo que sua presença otimize as propriedades mecânicas do concreto de acordo com as condições específicas de cada aplicação.

Tabela 9 – Resultado ensaio de tração PC2 1,0%.

Placas	Carga (N)	$l$	$b$	$d$	$f_{ct,f}$ (MPa)
PC2 - 1,0%	1281,7	450	150	25	6,152
PC2 - 1,0%	1024,85	450	150	25	4,919
PC2 - 1,0%	1110,26	450	150	25	5,329
Média	5,467 MPa				

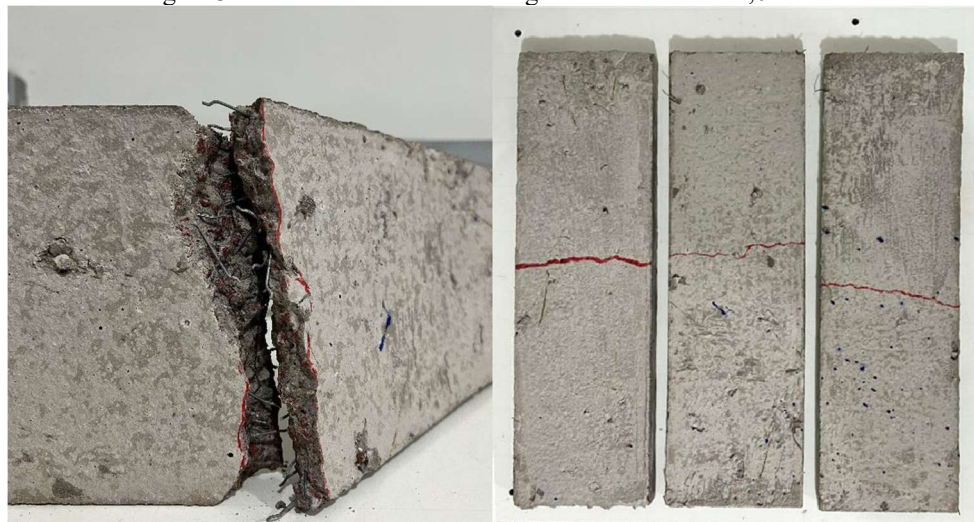
Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Figura 30 – Placas PC2 1,0% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Figura 31 – Detalhamento da ancoragem das fibras PC2 1,0% fibras.



a) ancoragem das fibras

b) padrão de fissuração

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Na Figura 31, é possível observar o rompimento das fibras, evidenciando o chamado “efeito costura”, no qual as fibras de aço atuam na contenção da propagação das fissuras iniciais. Esse mecanismo contribui para a redistribuição das tensões no material, retardando o avanço das trincas e garantindo uma maior capacidade de absorção de energia antes da ruptura total da placa.

#### 4.1.5 Placas Tipo 2 - 3D DRAMIX 45/50 BN, 1,5% de fibras

Para o grupo de placas PC2 com 1,5% de fibras, os resultados indicaram uma leve redução na média da resistência à tração na flexão em comparação às placas do mesmo tipo com menor teor de fibras (1,0%). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10.

É importante ressaltar que a presença de uma quantidade maior de fibras nem sempre resulta em um ganho proporcional de resistência, pois a distribuição em excesso ou a redução da trabalhabilidade do concreto podem influenciar negativamente o desempenho mecânico do material.

Tabela 10 – Resultado ensaio de tração PC2 1,5%.

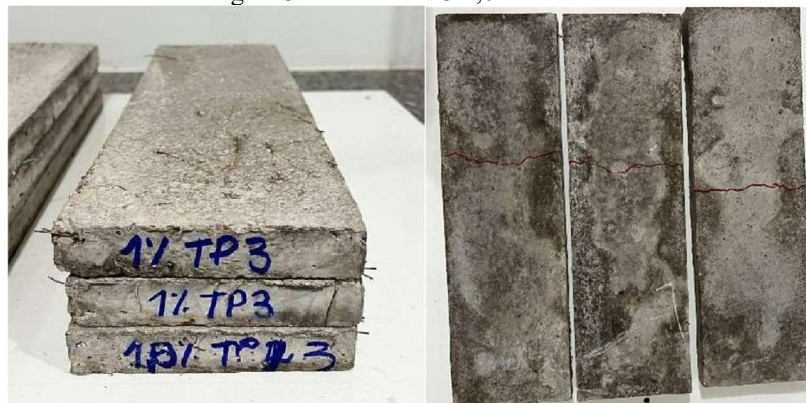
Placas	Carga (N)	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>f<sub>ct,f</sub></i> (MPa)
PC2 - 1,5%	939,45	450	150	25	4,509
PC2 - 1,5%	1366,47	450	150	25	6,559
PC2 - 1,5%	1024,85	450	150	25	4,919
Média	5,329 MPa				

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

#### 4.1.6 Placas Tipo 3 - 3D DRAMIX 65/60 BG, 1,0% de fibras.

Os resultados do ensaio de tração das placas PC3 1,0%, apresentados na Tabela 11, a Figura 32 mostra o padrão de fissuração. Os resultados indicaram um aumento expressivo na resistência à tração, alcançando uma média de 6,152 MPa. Comparadas a outras placas com o mesmo teor de fibra, mas compostas por materiais distintos, essas placas demonstraram um desempenho superior. Esse fato evidencia a relevância da escolha criteriosa do material e da dosagem apropriada da fibra, aspectos fundamentais para assegurar o comportamento mecânico esperado e aprimorar as propriedades estruturais do compósito.

Figura 32 – Placas PC3 1,0% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Tabela 11 – Resultado ensaio de tração PC3 1,0%.

Placas	Carga (N)	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>f<sub>ct</sub>,f</i> (MPa)
PC3 - 1,0%	1110,26	450	150	25	5,329
PC3 - 1,0%	1281,7	450	150	25	6,152
PC3 - 1,0%	1537,28	450	150	25	7,379
<i>Média</i>	6,287 MPa				

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

A Figura 33 ilustra a excelência do ensaio das placas, evidenciando a qualidade da junção entre a fibra de aço e o concreto, além da garantia da ancoragem das fibras na matriz. Esse resultado demonstra a efetividade da interação entre os materiais na melhoria da resistência das placas, contribuindo para o aumento de resistência um padrão de ruptura mais controlado e otimizado. Ressalta-se que não foi possível analisar a contribuição da resistência residual após a fissuração, visto a limitação do sistema de ensaio.

Figura 33 - Detalhamento da ancoragem das fibras PC3 1,0% fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

#### 4.1.7 Placas Tipo 3 - 3D DRAMIX 65/60 BG, 1,5% de fibras.

Por fim, as placas compostas com fibras PC3 1,5% (ver Figura 34) apresentaram resistência à tração média semelhante às de 1,0% do mesmo tipo de fibra. Contudo, a maior concentração de fibras resultou em um aumento significativo na ductilidade e tenacidade, proporcionando uma maior capacidade de absorção de energia antes da ruptura. Esse comportamento evidencia a influência positiva da dosagem de fibras na melhoria da resistência ao impacto e na capacidade do material de suportar deformações sem perda imediata de resistência estrutural. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 12. As Figuras 34 e

35 mostram o detalhamento do mapa de fissuração das peças e a garantia da ancoragem das peças ensaiadas.

Figura 34 – Placas PC3 1,5% de fibras.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Tabela 12 - Resultado ensaio de tração PC3 1,5%.

Placas	Carga (N)	$l$	$b$	$d$	$f_{ct,f}$ (MPa)
PC3 - 1,5%	1281,7	450	150	25	6,152
PC3 - 1,5%	1195,66	450	150	25	5,739
PC3 - 1,5%	1281,7	450	150	25	6,152
Média	6,014 MPa				

Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

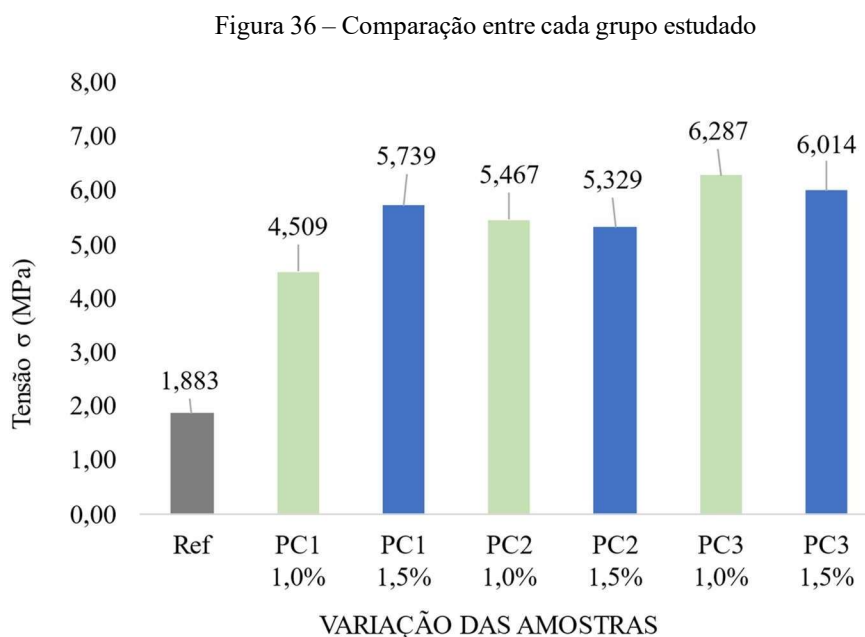
Figura 35 – Detalhamento de ancoragem das fibras PC3 1,5%.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

#### 4.1.8 Comparação entre as amostras

A comparação entre as amostras pode ser observada no gráfico da Figura 36. A partir desse gráfico, é possível extrair diversas conclusões sobre o desempenho dos diferentes tipos de fibras, bem como identificar o teor ideal de fibras na matriz do concreto para obter o melhor desempenho.



Fonte: Arquivo pessoal, 2025.

Os resultados apresentados no gráfico foram bastante esclarecedores e contribuíram significativamente para o alcance dos objetivos desta pesquisa. Em relação ao melhor teor de fibras, observou-se que o desempenho mais eficiente ocorreu com o uso do Tipo 3 de fibra da fabricante 3D DRAMIX 65/60 BG, em uma porcentagem de 1,0%. Quanto aos Tipos 2 e 3, ambos apresentaram resultados semelhantes, com pequenas variações entre si. Do ponto de vista econômico, o teor de 1,0% para os Tipos 2 e 3 mostrou-se mais vantajoso, uma vez que o aumento para 1,5% não resultou em ganhos significativos de resistência, nem em diferenças relevantes relacionadas ao tipo de fibra utilizada.

Por outro lado, as amostras de placas com o tipo 1 de fibras, a melhor resposta se deu com o teor de 1,5%, equiparando as demais em resistências. No entanto, o seu emprego deve-se considerar as questões de custo de mercado em comparação as demais, de modo a não as tornar antieconômicas.

De todo modo, todas as fibras desempenharam um papel fundamental na contribuição da resistência à tração do concreto. Cada uma, apresentou particularidade durante os ensaios.

Nesse sentido, foi possível evidenciar mais uma vez a contribuição efetiva desse material no estudo de compósitos com fibras.

## 5. CONCLUSÃO

Este estudo experimental sobre placas pré-moldadas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) permitiu avaliar a influência da adição de fibras nas propriedades mecânicas do concreto, especialmente na resistência à tração e no controle da propagação de fissuras. Os ensaios realizados demonstraram que a presença das fibras contribuiu significativamente para um comportamento mais dúctil do material, proporcionando maior tenacidade e capacidade de absorção de energia antes da ruptura.

Os resultados indicam que diferentes tipos e teores de fibras impactam diretamente na resistência do concreto, sendo essencial a escolha criteriosa dos materiais e das dosagens para maximizar os benefícios estruturais.

A fibra PC3 (1,0%) apresentou a maior resistência à tração na flexão entre todos os ensaios, devido a dosagem precisa da quantidade de fibras e a matriz de concreto. Resultando em uma melhor distribuição das tensões e controle da fissuração, otimizando a resistência pós-fissuração. Em contraste, a PC3 (1,5%) teve uma leve queda de desempenho, indicando que o excesso de fibras comprometeu a trabalhabilidade e a coesão do material. Assim, a dosagem de 1,0% mostrou-se a mais eficiente para maximizar a resistência do concreto.

Além das vantagens mecânicas, a incorporação de fibras de aço no concreto pode trazer benefícios econômicos e ambientais, reduzindo a necessidade de manutenção das estruturas ao longo do tempo. Esse aspecto é especialmente relevante para aplicações em infraestrutura, como pavimentos, lajes e elementos estruturais sujeitos a cargas cíclicas e impacto.

Diante do estudo, conclui-se que o CRFA apresenta um grande potencial para ampliar a durabilidade e a eficiência das estruturas de concreto, podendo ser uma alternativa viável ao concreto convencional em diversas aplicações da engenharia civil. Recomenda-se que estudos futuros aprofundem a análise do comportamento das placas reforçadas em condições de longo prazo, além da investigação de outros tipos de fibras e combinações que possam otimizar ainda mais suas propriedades.

## REFERÊNCIAS

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 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 15530: Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira 14931: Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2023.

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

ALMEIDA FILHO, F. M.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. **Avaliação do comportamento pós-fissuração de concretos reforçados com fibras de aço.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 11, n. 3, p. 550-567, 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.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** 2º 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.

CARVALHO, A. **Fibras de vidro.** São Paulo: EPUSP Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil, anais, 1993.

CASTRO, L. D. dos S. G. **Proposta analítica para estimar as resistências residuais à tração por flexão em concreto reforçado com fibra de aço.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2022.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. Boletim Técnico – Série BT/PCC/260, Escola Politécnica de São Paulo, 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.

LIMA, R. P. **Utilização de fibras metálicas Com funções estruturais em Estruturas de betão**. Mestrado Integrado em Engenharia Civil -2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª edição. McGraw-Hill, Nova Iorque, 2006.

MIGLIORINI, A.V.1; Guimarães, A.T.C.2; Ozório, B.P.M. **Fibras de aço em blocos de concreto: estudo para utilização em ambiente marítimo**. Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande, RS, 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 4ª Edição, Pearson Higher Education, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1996.

NING, X. et al. Experimental study and prediction model for flexural behavior of reinforced SCC beam containing steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 644–653, 2015.

SILVA, E. R. M. **Análise do comportamento de vigas de concreto reforçado com fibras de polipropileno**. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste do Pará. Itaituba, 2024.

SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; REIS, J. M. L. **Avaliação do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço sob carregamento de impacto**. Revista Matéria, v. 24, n. 3, 2019.)

SOUZA, L. M. S.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. **Comportamento à fadiga de concretos reforçados com fibras de aço**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, n. 4, p. 720-735, 2019.)

TOLEDO FILHO, R. D.; SILVA, F. A.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Contribuição das fibras de aço na tenacidade e resistência à propagação de fissuras em compósitos cimentícios**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 28, n. 4, p. 467-478, 2005.