



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CAMPUS DE AÇAILÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS E LETRAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JHONAS MAGALHÃES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS DE AÇO GALVANIZADO
SUBSTITUIDAS PARCIALMENTE POR MICROFIBRA DE
POLIPROPILENO**

Açailândia – MA
2026





Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

JHONAS MAGALHÃES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS DE AÇO GALVANIZADO
SUBSTITUIDAS PARCIALMENTE POR MICROFIBRA DE
POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
Bacharelado do Centro de Ciências
Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da
Universidade Estadual da Região Tocantina
do Maranhão – UEMASUL, campus
Açailândia, como requisito parcial para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esp. Ramon Reis
Rodrigues

Açailândia – MA
2026





Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

O48a

Oliveira, Jhonas Magalhães de

Análise comparativa das propriedades mecânicas de concreto reforçado por fibras de aço galvanizado substituídas parcialmente por microfibras de polipropileno / Jhonas Magalhães de Oliveira. – Açailândia: UEMASUL, 2026.
62 f. ; il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Açailândia, MA, 2026.

Orientador: Prof. Esp. Ramon Reis Rodrigues.

1. Concreto reforçado. 2. Fibra de aço galvanizado. 3. Microfibras de polipropileno. I. Título.

CDU 691.32

*Ficha Catalográfica elaborada por **Jarina Santos** – Bibliotecária CRB 13/953*



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

JHONAS MAGALHAES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS DE AÇO GALVANIZADO
SUBSTITUIDAS PARCIALMENTE POR MICROFIBRAS DE
POLIPROPILENO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do
Centro de Ciências Humanas, Sociais, Tecnológicas
e Letras da Universidade Estadual da Região
Tocantina do Maranhão – UEMASUL, campus
Açailândia, como requisito parcial para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esp. Ramon Reis Rodrigues

APROVADO EM: 11/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Ramon Reis Rodrigues (Orientador)

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL

Prof. Dr. Danilo Gualberto Zavarize (Avaliador Interno)

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL

Eng. Me. João Franco Filho (Avaliador Externo)

Universidade Federal do Pará – UFPA



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

*À deus, meus amigos, professores
e minha família, que sempre
acreditaram no meu potencial e
foram o alicerce fundamental para
que eu chegasse aqui.*





AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pois nada acontece sem a Sua permissão e vontade. Foi Ele quem me sustentou nos momentos de dificuldade, me concedeu força para perseverar diante dos desafios e me guiou durante toda esta caminhada acadêmica. A Ele dedico minha gratidão por todas as bênçãos recebidas e pela oportunidade de concluir mais esta etapa da minha vida.

Agradeço, com todo amor e carinho, à minha família, que sempre foi meu alicerce e principal fonte de incentivo. Em especial, à minha mãe, Maria Pinto Magalhães, ao meu pai, Jesuino Ferreira de Oliveira, e à minha irmã, Iranilde Magalhães, por todo apoio, dedicação, ensinamentos e sacrifícios realizados ao longo da minha trajetória. Esta conquista também pertence a vocês, que contribuíram diretamente para minha formação pessoal e profissional.

Expresso minha sincera gratidão ao Prof. Remi Ferreira Dantas, que teve papel fundamental na minha escolha pelo curso de Engenharia Civil. Mais do que isso, foi o ponto de partida para o despertar do meu interesse pela engenharia, sendo uma das primeiras referências que me inspiraram a seguir esta profissão. Seu exemplo profissional, seus ensinamentos e seus conselhos foram determinantes para que eu trilhasse este caminho, tornando-se uma importante referência em minha jornada acadêmica e profissional.

Agradeço de forma especial ao meu orientador, Prof. Esp. Ramon Reis Rodrigues, pela dedicação, paciência, disponibilidade e pelos valiosos conhecimentos compartilhados durante a elaboração deste trabalho. Mais do que um orientador, foi uma grande inspiração profissional e acadêmica, contribuindo significativamente para meu crescimento como futuro engenheiro.

Minha gratidão também ao Eng. Me. João Franco Filho e a todos os colaboradores da Franco Engenharia, que gentilmente disponibilizaram a estrutura necessária para a realização desta pesquisa. Em especial, agradeço a Carlos, Raimundo, Rodrigo e Jefferson, que estiveram presentes durante a execução dos ensaios laboratoriais, oferecendo apoio, conhecimento e auxílio indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Danilo Gualberto Zavarize, pelas orientações, sugestões e contribuições que enriqueceram esta pesquisa e auxiliaram no seu aperfeiçoamento.

Meu agradecimento também ao Walneis Thiago Silva, que esteve presente ao longo do desenvolvimento deste trabalho, colaborando na realização dos ensaios laboratoriais e contribuindo de maneira significativa para a concretização desta pesquisa.

Agradeço à banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas contribuições oferecidas, que certamente agregam valor à presente pesquisa e à minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço à minha namorada, Bárbara Luíza, pelo companheirismo, incentivo, compreensão e apoio durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica e profissional, deixo aqui meu sincero agradecimento.



RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental comparativo sobre a influência da incorporação de microfibras de polipropileno em concretos reforçados, com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico das diferentes composições em termos de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão. Foram realizadas análises experimentais utilizando um concreto de referência, sem adição de fibras, e concretos com teores de 0,6 kg/m³, 4 kg/m³ e 8 kg/m³ de microfibra de polipropileno, moldados em corpos de prova cilíndricos e prismáticos e submetidos a ensaios aos 7, 14 e 28 dias de cura. A abordagem metodológica empregada atendeu às normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), adotando o método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e os procedimentos de controle tecnológico aplicáveis aos agregados utilizados neste estudo. Os dados coletados possibilitaram avaliar o desempenho mecânico dos concretos reforçados com microfibras, verificando a influência dos distintos teores incorporados sobre as propriedades investigadas. O estudo avança o conhecimento sobre a tecnologia de concretos reforçados com fibras, apontando a microfibra de polipropileno como opção tecnicamente viável para controlar fissuras e aprimorar o desempenho do material, expandindo as perspectivas de emprego desse tipo de reforço em elementos de concreto e oferecendo base para investigações e aplicações futuras na construção civil.

Palavras-chave: concreto reforçado, fibra de aço galvanizado, microfibra de polipropileno, ensaio de compressão, ensaio de tração, resistência mecânica.



ABSTRACT

This work presents a comparative experimental study on the influence of incorporating polypropylene microfibers in reinforced concrete, aiming to evaluate the mechanical performance of different compositions in terms of axial compressive strength and flexural tensile strength. Experimental analyses were performed using a reference concrete, without fiber addition, and concretes with contents of 0.6 kg/m³, 4 kg/m³, and 8 kg/m³ of polypropylene microfiber, molded in cylindrical and prismatic specimens and subjected to tests at 7, 14, and 28 days of curing. The methodological approach employed complied with the technical standards of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT), adopting the dosage method of the Brazilian Portland Cement Association (ABCP) and the technological control procedures applicable to the aggregates used in this study. The collected data made it possible to evaluate the mechanical performance of the microfiber-reinforced concretes, verifying the influence of the different incorporated contents on the investigated properties. This study advances knowledge about fiber-reinforced concrete technology, highlighting polypropylene microfibers as a technically viable option for controlling cracks and improving material performance, expanding the prospects for using this type of reinforcement in concrete elements and providing a basis for future investigations and applications in civil construction.

Keywords: Reinforced concrete, galvanized steel fiber, polypropylene microfiber, compression test, tensile test, mechanical strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E TABELAS E GRÁFICOS

Ilustrações:

Figura 1.	Fibra com ancoragem nas extremidades (a), fibra com ondulações no corpo (b) e fibra reta sem ancoragens (c)	20
Figura 2.	Microfibra de polipropileno	21
Figura 3.	Macrofibra artesanal de aço galvanizado	27
Figura 4.	Separador de amostras e quarteamento do agregado graúdo	29
Figura 5.	Peneiras com diferentes aberturas para separação granulométrica	29
Figura 6.	Frasco de Chapman para ensaios de densidade do grão mineral	30
Figura 7.	Cesto metálico para a realização do ensaio	32
Figura 8.	Pesagem da brita sem compactação e com compactação	34
Figura 9.	Preenchimento do cone de <i>slump test</i>	35
Figura 10.	Corpo de prova cilíndrico na máquina de ensaio	36
Figura 11.	Características da norma ABNT NBR 12142:2010 para os ensaios de resistência à tração na flexão e ilustração dos testes com corpo de prova	37
Figura 12.	Curva de Abrams para determinação da relação a/c	44
Figura 13.	Registros fotográficos do teste de abatimento de cone	46

Tabelas:

Tabela 1.	Designação normalizada dos tipos de cimento Portland.	12
Tabela 2.	Dimensões e nomenclaturas das britas.	14
Tabela 3.	Propriedades físicas, químicas e geométricas das fibras.	19
Tabela 4.	Design das variáveis independentes para os ensaios de compressão e tração	24
Tabela 5.	Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo	38
Tabela 6.	Resultados do ensaio de granulometria do agregado graúdo	39
Tabela 7.	Dados experimentais dos ensaios para massa específica dos componentes	41
Tabela 8.	Experimentos para determinação da massa unitária dos agregados graúdos	42
Tabela 9.	Design dos traços experimentais para agregação das fibras	45
Tabela 10.	Quantificação do comportamento do traço sob diferentes teores de fibras	47
Tabela 11.	Comparação das resistências médias de compressão aos 7, 14 e 28 dias de cura.	49
Tabela 12.	Comparação das resistências médias a flexão aos 28 dias de cura.	53

Gráficos:

Gráfico 1.	Resistência a compressão e tração (prismas)	49
Gráfico 2.	Resistência a tração na flexão nos prismas aos 28 dias de cura	52



Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. Objetivo Geral	11
2.2. Objetivos Específicos	11
3. REFERENCIAL TEORICO	12
3.1. Concreto: Composições e Características	12
3.1.1. Cimento	12
3.1.2. Agregados	13
3.1.3. Areia e Água	15
3.1.4. Aditivos	16
3.2. Fibras	17
3.2.1. Fibras de Aço Galvanizado	17
3.2.2. Microfibras	20
4. METODOLOGIA	23
4.1. Tipo de Pesquisa	23
4.2. Materiais	24
4.2.1. Cimento	24
4.2.2. Agregado Graúdo	25
4.2.3. Agregado Miúdo	25
4.2.4. Aditivo	25
4.2.5. Fibras	26
4.3. Métodos	27
4.3.1. Confecção do Concreto de Referência - ABCP	27
4.3.2. Caracterização dos Agregados	28
4.3.2.1. Granulometria	28
4.3.2.2. Massa Específica Aparente	30
4.3.2.2.1. Agregado Miúdo	30
4.3.2.2.2. Agregado Graúdo	32
4.3.2.2.3. Massa Unitária	32
4.3.3. Slump test	35
4.3.4. Moldagem dos Corpos de Prova	35
4.3.4.1. Ensaio de Resistência a Compressão	35



4.3.4.2. Ensaio de Resistência a Tração na Flexão	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1. Composição Granulométrica dos Agregados	38
5.2. Massa Específica	40
5.3. Massa Unitária	41
5.4. Dosagem ABCP	43
5.5. Abatimento Tronco-Cone	46
5.6. Resistência a Compressão e Tração	48
5.7. Resistência a Tração na Flexão	51
6. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

Um dos materiais mais empregados na construção civil contemporânea é o concreto, sendo amplamente utilizado em diversas obras de infraestrutura urbana e engenharia estrutural, tais como edificações, pontes, pavimentos, barragens e estruturas especiais. Sua vasta aplicação está associada à facilidade de obtenção dos materiais constituintes, ao custo relativamente acessível e à sua excelente capacidade de moldagem em diferentes formas e proporções, além de uma notável resistência aos esforços de compressão e viabilidade econômica (Neville, 2016).

Apesar dessas vantagens intrínsecas, o concreto Portland convencional apresenta limitações mecânicas importantes e severas, principalmente no que se refere à sua baixa resistência à tração (variando entre 8% e 12% da sua capacidade compressiva), ao comportamento frágil e à propensão à fissuração prematura induzida por retração plástica e autógena. Historicamente, essa fragilidade frente aos esforços tracionais foi contornada por meio do uso de armaduras convencionais de aço, dando origem ao concreto armado tradicional.

No entanto, com o contínuo avanço da tecnologia dos materiais, a crescente complexidade das obras modernas exigiu o desenvolvimento de compósitos com desempenho mecânico otimizado e elevada durabilidade. Como alternativa complementar ao uso exclusivo das armaduras, consolidou-se nas últimas décadas a tecnologia do Concreto Reforçado com Fibras (CRF). A incorporação de filamentos discretos e distribuídos de forma aleatória no interior da matriz cimentícia proporciona melhorias significativas no comportamento do material, atuando como elementos de reforço que criam mecanismos de ponte ou costura (*bridging*) sobre as fissuras, retardando sua propagação e aumentando a absorção de energia.

Entre os diversos tipos de reforços disponíveis no mercado, as macrofibras de aço são extensamente empregadas em aplicações estruturais submetidas a esforços dinâmicos, impacto e fadiga, devido ao seu alto módulo de elasticidade, alta resistência à tração e boa aderência à matriz cimentícia. No estado endurecido, essas macrofibras operam no estágio de macrofissuração, conferindo capacidade de carga residual e tenacidade ao composto. Por outro lado, as microfibras poliméricas, como as de polipropileno, atuam predominantemente na microescala durante as primeiras idades da pasta, bloqueando a coalescência de microfissuras decorrentes da perda de água por evaporação e mitigando os efeitos deletérios da retração plástica e térmica.

Contudo, investigações científicas recentes apontam que o uso isolado de um único tipo de filamento pode limitar o potencial de proteção do compósito. Nesse cenário, as pesquisas na ciência dos materiais direcionaram-se para o conceito de hibridização, dando origem ao

Concreto Reforçado com Fibras Híbridas (CRFH). Essa técnica consiste na combinação sinérgica de dois ou mais tipos de fibras com geometrias e propriedades mecânicas distintas, buscando estabelecer um controle de fissuração multiescala (*multi-scale cracking control*), no qual as microfibras poliméricas inibem o desenvolvimento dos defeitos internos na matriz fresca e as macrofibras de aço suportam as tensões pós-fissuração na matriz endurecida, resultando em um material com comportamento mecânico mais equilibrado, dúctil e eficiente.

Apesar dos benefícios mecânicos, a introdução de teores elevados de filamentos poliméricos de alta área específica tridimensional impõe severas restrições à reologia do concreto fresco, gerando perdas acentuadas de trabalhabilidade que podem comprometer o adensamento e induzir a formação de macrovazios na estrutura interna do material. No âmbito regional do Estado do Maranhão, as pesquisas conduzidas nos laboratórios da UEMASUL por Pereira (2025) e Souza (2025) estabeleceram traços base de referência com agregados locais, evidenciando a necessidade de um controle rigoroso do empacotamento granular face à introdução de reforços fibrosos.

Justifica-se, portanto, a relevância científica e a necessidade desta análise comparativa na importância de mapear o limite técnico de hibridização e o comportamento reológico do compósito quando submetido a uma estratégia de substituição parcial de macrofibras de aço por teores crescentes de microfibras de polipropileno. Utilizando os agregados disponíveis na região de Imperatriz - MA, este estudo fornece subsídios práticos para a aplicação racional desses materiais na engenharia civil, auxiliando na compreensão do seu desempenho e no desenvolvimento de estruturas que demandem maior controle de fissuração, desempenho estrutural e durabilidade.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar análise comparativa das características mecânicas do concreto reforçado com macrofibras de aço galvanizado parcialmente substituída por microfibras de polipropileno.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento mecânico do concreto reforçado com macrofibras de aço galvanizado e microfibras de polipropileno em ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão;
- Analisar os efeitos de diferentes proporções de microfibras de polipropileno no controle da fissuração e no comportamento pós-fissuração do concreto comparado ao concreto sem reforço ou com diferentes tipos de fibras;
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios com concreto reforçado por fibras de aço galvanizado e microfibras de polipropileno em relação ao concreto sem fibras.

3. REFERENCIAL TEORICO

3.1. Concreto: Composições e Características

3.1.1. Cimento

O concreto é um material composto que resulta da combinação de cimento, agregados, água e, opcionalmente, aditivos e adições minerais. As características de um material dependem diretamente da qualidade e da quantidade de seus componentes, além dos processos de mistura, moldagem, adensamento e cura (Neville, 2016).

O cimento Portland é definido como um aglomerante hidráulico dotado de propriedades adesivas e coesivas que, ao reagir com a água, promove a união de agregados minerais, resultando em uma massa compacta e resistente. Sua denominação histórica remonta ao século XIX, devido à semelhança da pasta endurecida com a pedra de construção extraída da ilha de Portland, na Inglaterra. Essencialmente, o material é obtido pela moagem fina do clínquer, que é um produto da queima de matérias-primas ricas em calcário, argila, sílica, alumina e óxidos de ferro em temperaturas elevadas de clínquerização (1350°C e 1450°C), frequentemente acrescido de gesso para controle o tempo de pega (Neville, 2016; Liew *et al.*, 2020).

No Brasil, a especificação técnica e o controle de qualidade dos cimentos são regidos pela ABNT NBR 16697:2018 (Tabela 1), que categoriza cimentos pelas adições (escória, pozolana, fíler calcário) e o desempenho esperado em termos de resistência à compressão, tempo de pega e durabilidade frente ao ataque de agentes agressivos (como sulfatos e cloretos).

Tabela 1. Designação normalizada dos tipos de cimento Portland.

Designação	Sigla	Principais Características
<i>Comum</i>	CP I / CP I-S	Uso geral sem exigências especiais.
<i>Composto</i>	CP II-E, CP II-F, CP II-Z	Adições de escória, fíler ou pozolana; versáteis.
<i>Alto-Forno</i>	CP III	Elevado teor de escória; excelente durabilidade.
<i>Pozolânico</i>	CP IV	Baixo calor de hidratação; resistência a sulfatos.
<i>Alta Res. Inicial</i>	CP V-ARI	Alta finura; desforma rápida.
<i>Branco</i>	CPB	Foco em aplicações arquitetônicas e estruturais.

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (2018)

A escolha do tipo de cimento (por exemplo, a preferência pelo CP II-E em obras de infraestrutura) é um passo crítico no projeto de dosagem, pois cada subtipo altera a cinética de hidratação, a trabalhabilidade da massa fresca e a porosidade da pasta endurecida. Isso se deve ao fato de que o cimento, quando em contato com a água, inicia reações químicas exotérmicas (hidratação) que levam à formação de produtos como o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de portlandita (Neville, 2016).

Esta transformação é a responsável pela passagem do estado plástico (concreto moldável) para o estado sólido (aquisição de capacidade resistente). No entanto, é fundamental reconhecer que a matriz cimentícia, embora possua resistência à compressão, pode apresentar deficiências estruturais intrínsecas (Fusco e Onishi, 2018):

- **Fragilidade:** O concreto possui comportamento elástico limitado; uma vez superado esse regime, ele tende à ruptura brusca sem aviso prévio de deformação plástica significativa, um fenômeno amplamente estudado por Fusco e Onishi (2018).
- **Limitação à Tração:** Devido à natureza de material inorgânico quebradiço, a resistência à tração é muito inferior à de compressão, o que torna imperativa a utilização de reforços adicionais como as fibras (aço e polipropileno) discutidas anteriormente para conferir tenacidade e controle de fissuração ao compósito.

Portanto, o cimento atua como o esqueleto químico da unidade compacta, mas é a sinergia entre a escolha criteriosa deste aglomerante e o uso de reforços externos que definirá a durabilidade e o desempenho de uma estrutura sob solicitações de serviço e tensões aplicadas.

3.1.2. Agregados

No que tange os agregados do concreto, são fundamentais para o desempenho mecânico, térmico e químico do material e ocupam entre 60% a 80% do volume absoluto. De acordo com a norma ABNT NBR 9935:2024, os agregados são materiais de granulometria pétreo e massa específica determinada, que podem ser obtidos por fragmentação natural ou artificial e devem isentos de contaminantes (argila, húmus ou detritos).

Desse modo, a correta seleção e caracterização desses materiais são fatores determinantes para a durabilidade da estrutura e viabilidade econômica da dosagem, dado que a granulometria (fina, média ou grossa) e a massa específica alteram diretamente a trabalhabilidade e a coesão da mistura (Neville, 2016; Qiang *et al.*, 2021). Portanto, a distribuição granulométrica deve ser variada (sem grãos de tamanho único) assim como a massa específica, pois o empacotamento

eficiente influenciado diretamente por esses fatores reduz a demanda por pasta de cimento e minimiza vazios, exsudação e retração (Mehta; Monteiro, 2008; Weidmann, 2008).

Segundo a ABNT NBR 7211:2022, os agregados podem ser classificados quanto a massa específica como normais, pesados ou leves e, quanto a granulometria, como miúdos e graúdos. No que tange a massa específica, os considerados normais apresentam massa entre 1,5 e 1,8 t/m³, ao passo que os pesados possuem massa superior a 1,8 t/m³ e são especificamente usados para blindagem contra radiação ou estruturas especiais. Os leves, por outro lado, possuem baixa massa específica e são usados em concretos isolantes térmicos ou acústicos.

No que tange o fator granulometria dos agregados, podem ser classificados como miúdos ou graúdos, com as seguintes características (ABNT NBR 7211, 2022):

- **Agregados Miúdos:** consistem em grãos que passam na peneira ABNT 4,8 mm e são retidos na ABNT 0,075 mm, de origem natural (leitos de rios, jazidas) ou resultantes da britagem de rochas estáveis.
- **Agregados Graúdos:** partículas retidas na peneira de 4,75 mm que variam em aberturas nominais conforme a necessidade do projeto estrutural e conferem estabilidade volumétrica e auxiliam na redução da retração da mistura.

Dentre os agregados graúdos destaca-se a brita pelo papel fundamental na resistência e estabilidade do concreto, na redução da retração da mistura, e na melhora do empacotamento dos grãos, que contribui para a durabilidade da estrutura (ABNT NBR 7211, 2022). A escolha do tipo e da granulometria da brita (Tabela 2) leva em consideração tanto o concreto utilizado como as condições da obra, de modo a garantir um melhor desempenho e trabalhabilidade do material.

Tabela 2. Dimensões e nomenclaturas das britas.

Nomenclatura	Dimensões (mm)
Brita nº 0	4,8 a 9,5
Brita nº 1	9,5 a 19
Brita nº 2	19 a 25
Brita nº 3	25 a 38
Brita nº 4	38 a 64

Fonte: Adaptado NBR 7211 (2022)

Ressalta-se, ainda, que o intertravamento gerado pela forma das britas também desempenha papel estrutural (Almeida, 2012; Farokhzad *et al.*, 2016):

- **Formas Arredondadas:** favorecem a trabalhabilidade e o adensamento devido ao menor atrito interno.
- **Formas Angulosas (britadas):** possuem maior área superficial e maior capacidade de engrenamento, o que resulta em maior resistência à tração e flexão no concreto endurecido.

A eficiência do concreto de alto desempenho, portanto, tende a residir na denominada "mistura granula" (ou seja, a combinação de agregados miúdos e graúdos), em que frações de tamanhos distintos preenchem os vazios umas das outras e otimiza o esqueleto sólido (Uma; Suganya; Saranya, 2017). Além desses materiais tradicionais, a tendência contemporânea de sustentabilidade permite a inclusão de agregados reciclados ou subprodutos industriais, desde que comprovada a durabilidade, absorção de água e resistência ao impacto, consideradas ainda as especificações de cada projeto (Sandoval, 2014).

3.1.3. Areia e Água

Um dos principais componentes do concreto é a areia, classificada como agregado miúdo. É formada pela desagregação natural das rochas e pode ser encontrada em leitos de rios, jazidas ou resultante de processos de britagem. De acordo com a granulometria, a areia pode ser fina, média ou grossa, que influenciam diretamente a trabalhabilidade, a resistência e o acabamento do concreto. A escolha da areia adequada é essencial para garantir uma mistura homogênea e de boa qualidade, para evitar excesso de vazios e melhorar o desempenho do material na construção civil (Monteiro, 2014).

Um ponto crítico na dosagem técnica de areia em concretos é o controle da umidade inerente. Isto é, como a água de amassamento é o fator que mais influencia a resistência e a durabilidade, o teor de umidade da areia deve ser rigorosamente quantificado antes do traço. Portanto, para garantir a homogeneidade, a estocagem deve ocorrer em baias drenadas, evitando a segregação ou a lixiviação de finos durante o armazenamento (ABNT NBR 7211, 2022).

A água é um componente essencial do concreto, pois reage com o cimento e forma a pasta que une os agregados e dá resistência e coesão ao material. A quantidade, portanto, deve ser cuidadosamente controlada: o excesso aumenta a porosidade e reduz a resistência, enquanto a falta dificulta o manuseio e o adensamento. Assim, a proporção entre água e cimento, chamada relação água/cimento, é determinante para garantir a trabalhabilidade, a durabilidade e o bom desempenho do concreto com o passar do tempo (Mehta; Monteiro, 2014).

3.1.4. Aditivos

Os aditivos químicos, embora não sejam componentes primordiais para a existência física do concreto, tornaram-se indispensáveis na engenharia contemporânea para refinar, modificar e melhorar as propriedades das matrizes cimentícias nos estados fresco e endurecido. De acordo com a ABNT NBR 11768-1:2019, que regulamenta e detalha tais insumos, os aditivos são substâncias introduzidas durante o processo de mistura do concreto, em teores geralmente não superiores a 5% da massa de material cimentício, para alcançar trabalhabilidade, resistência e durabilidade estrutural (Neville, 2016; Oliveira, Natalina, 2020).

No âmbito do desenvolvimento de concretos de alto desempenho e, especialmente, daqueles reforçados com fibras, os aditivos plastificantes (com capacidade redutora de água) e os superplastificantes (altos redutores de água) desempenham papel de importância crítica. O mecanismo de ação físico-química desses compostos baseia-se na presença de macromoléculas tensoativas, como os lignosulfonatos de sódio ou cálcio, gluconatos de sódio, e os modernos polímeros de policarboxilato. Ao serem introduzidos na água de amassamento, esses agentes reduzem a tensão superficial do líquido e induzem a ocorrência dos fenômenos de repulsão eletrostática e impedimento estérico na superfície dos grãos de cimento. Esse processo desfaz os flocos naturais que aprisionam a água e dispersam homogeneamente as partículas, que liberam o fluido para atuar na lubrificação eficaz do esqueleto sólido (Abduche; Augusto, 2010; Mehta; Monteiro, 2008).

Essa dispersão molecular eficiente gera duas ramificações tecnológicas fundamentais para a dosagem: a possibilidade de reduzir severamente o fator água/cimento (a/c) para manter a consistência e aumentar a compacidade mecânica final, ou ainda o incremento exponencial da trabalhabilidade e do abatimento (*slump*) sem a necessidade de adição de água extra, que previne a queda de resistência provocada pela diluição da pasta. Conforme apontam Galeno et al. (2020), o controle do fator a/c via aditivação é o parâmetro que governa a permeabilidade e a estabilidade dimensional do compósito e, assim, mitiga os riscos associados à exsudação e à segregação de agregados e fibras.

Em pesquisas focadas na hibridização e inserção de reforços fibrosos, destaca-se que a introdução de microfibras de polipropileno e macrofibras metálicas impõe uma severa restrição reológica ao concreto fresco, pois aumenta o atrito interno e gera um fenômeno conhecido como travamento da mistura. Estudos recentes corroboram que a adição do aditivo plastificante atua exatamente como o agente compensador desse ganho de viscosidade (Figueiredo, 2011).

Ao reduzir a fricção na interface pasta-agregado-fibra, o aditivo viabiliza o adensamento e o preenchimento homogêneo das formas estruturais para o espalhamento tridimensional e aleatório dos filamentos, sem que haja perda de abatimento, ou macrovazios aprisionados ou prejuízo à hidratação e clinquerização tardia do ligante (Cheung; Roberts; Liu, 2018; Lucas, 2025). Portanto, o uso sinérgico de aditivos de alto desempenho consolida-se como um pilar reológico que permite associar elevados teores de fibras a matrizes densas, duráveis e de alta resistência.

3.2. Fibras

3.2.1. Fibras de Aço Galvanizado

Desde as civilizações antigas há um interesse renovado por materiais compósitos, nos quais utilizavam-se desde palhas e gravetos como forma de melhorar a resistência mecânica de utensílios e habitações primitivas. Tais processos empíricos tinham como intuito inicial mitigar a fragilidade das matrizes e agregar propriedades de resistência para prevenção ou retardamento do surgimento de fissuras (Hasan; Rabino; Maruf Billah, 2022).

Ao transpor esse conceito para a engenharia contemporânea, Quinino (2015) salienta que a deficiência intrínseca do concreto convencional face aos esforços de impacto e à propagação de fissuras tem sido o principal elemento motivador para o emprego de reforços fibrosos no material. O autor também ressalta que inserção de fibras discretas é um excelente elemento de reforço estrutural, que gera ganhos significativos de capacidade portante à matriz cimentícia e proporciona o aumento da durabilidade global do compósito.

De acordo com Figueiredo (2011), todo e qualquer elemento exógeno que é adicionado intencionalmente ao concreto para melhoria mecânica o constitui em um material composto ou compósito. No âmbito das tecnologias do concreto, esse termo é frequentemente associado ao Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA), em que filamentos metálicos são dispersos homogeneamente no material.

Os aspectos mecânicos de compósitos reforçados com fibras não estão associados apenas às propriedades isoladas do filamento mas, primordialmente, à eficiência na capacidade de transferência de carga na interface entre a fibra e a matriz. Para que esse mecanismo ocorra de forma satisfatória, Kuruvilla et al. (2021) apontam a necessidade da fibra possuir comprimento crítico. Esse parâmetro, que resulta em um aumento expressivo de resistência do compósito, é governado diretamente pela relação entre o diâmetro da fibra, o limite de resistência à tração e

a aderência superficial desenvolvida junto à matriz.

A introdução da fibra de aço no concreto eleva a ductilidade e a capacidade de carga residual, dado que os filamentos atuam mecanicamente como "pontes de transferência de tensão" (*bridging effect*) e costuram as bordas das fissuras à medida em que se abrem, ao passo que minimizam as concentrações de tensões na extremidade do defeito e contem o colapso frágil. Portanto, o comportamento mecânico pós-fissuração do concreto depende diretamente do comprimento e do teor (quantidade em massa) das fibras incorporadas (Figueiredo, 2000).

Para Gonçalves, Lima e Rodrigues (2019), a presença de reforços metálicos em frações volumétricas adequadas permite que o concreto persista sob elevados gradientes de deformação e tensões tracionais, mesmo após a matriz sofrer algum dano inicial, ao passo que mitiga o comportamento frágil que caracteriza o concreto liso. Assim, se o concreto convencional possui baixa resistência à tração, a ruptura ocorre de forma repentina se submetido a esforço.

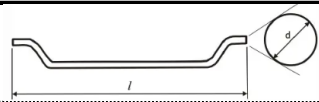
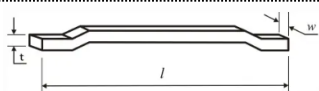
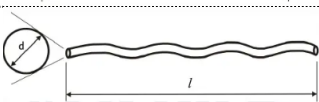
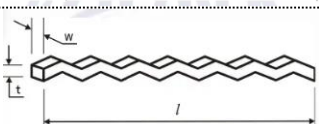
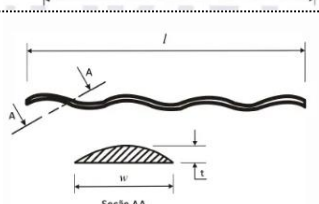
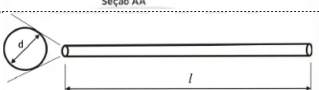
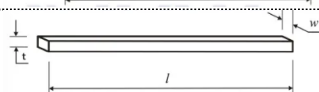
O uso das fibras na matriz cimentícia desempenha papel essencial no quesito capacidade de resistência residual pós-fissuração (Naaman, 2013). Para cumprir critérios estruturais, Ferraz (2016) adverte que as fibras devem apresentar módulo de elasticidade superior ao da matriz cimentícia envolvente e estabilidade química para não sofrer degradação acelerada em contato com o ambiente altamente alcalino da pasta de cimento.

No mercado de construção civil existe uma vasta gama de materiais fibrosos (fibras de vidro, poliméricas, carbono, cerâmicas e naturais) para uso em matrizes cimentícias. Contudo, a depender do local de aplicação e da agressividade do meio, alguns materiais podem manifestar incompatibilidades. A fibra de vidro, por exemplo, pode sofrer forte deterioração ao ser atacada pelos álcalis do cimento, o que direciona a preferência da engenharia estrutural para soluções mais estáveis e de alto módulo, como as fibras à base de aço carbono (Figueiredo, 2000).

As propriedades físicas, geométricas e químicas das fibras metálicas são normatizadas no cenário nacional pela ABNT NBR 15530:2019 (Tabela 3). A norma regulamenta as diretrizes que determinam as características dos filamentos de modo a garantir a eficiência no reforço estrutural. Quanto a geometria e ancoragem, a norma classifica as fibras em três principais grupos:

- **Tipo A:** Com ancoragem mecânica nas extremidades (ganchos);
- **Tipo C:** Corrugadas ao longo do seu comprimento;
- **Tipo R:** Retas (sem dispositivos de ancoragem nas extremidades).

Tabela 3. Propriedades físicas, químicas e geométricas das fibras.

Tipo (Geometria)	Classe da Fibra	Geometria	Fator de Forma Mínimo (λ)	Limite de Resistência à Tração (f_u) (MPa)
A	I		40	1000
	II		30	500
C	I		40	800
	II		30	500
	III		30	800
R	I		40	1000
	II		30	500

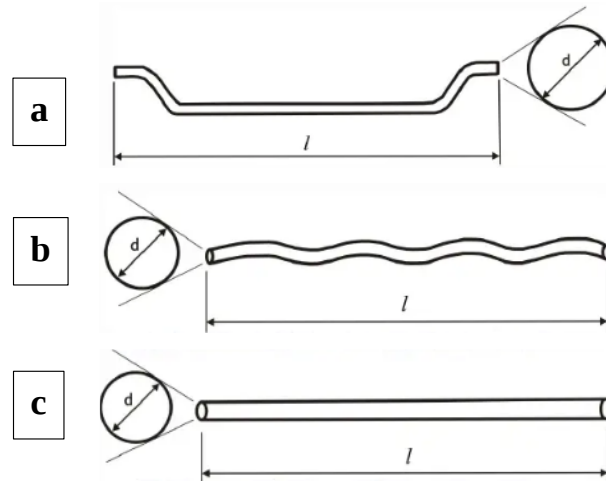
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15530 (2019).

Além da geometria e demais propriedades, a ABNT NBR 15530:2019 estabelece uma classificação crucial referente à proteção superficial e durabilidade das fibras: as fibras polidas (*bright*) e as fibras galvanizadas (providas de revestimento protetor à base de zinco). No desenvolvimento de pesquisas com insumos alternativos locais e arames comerciais, o uso do arame galvanizado destaca-se como uma variante viável para a confecção de macrofibras. Isto é, a presença da camada de galvanização atua na minimização dos riscos de corrosão prematura dos filamentos expostos à fissuração e às intempéries, que preserve a seção transversal útil do metal e garanta a manutenção da aderência e da transferência de tensões pós-fissuração a longo prazo (Pereira, 2017).

Ressalta-se, ainda, que a eficácia do reforço está condicionada ao correto empacotamento dimensional dentro da matriz. Segundo critérios técnicos consolidados por Figueiredo (2000), para que operem com eficiência mecânica e não induzam falhas de adensamento, propõe-se que o comprimento nominal das fibras deve respeitar um limite correlacionado ao diâmetro máximo

do agregado graúdo utilizado (Figura 1).

Figura 1. Fibra com ancoragem nas extremidades (a), fibra com ondulações no corpo (b) e fibra reta sem ancoragens (c)



Fonte: Adaptado de ABNT NBR15530 (2019).

Conforme as prescrições complementares associadas à prática nacional de ensaios e especificações de macrofibras, o comprimento desses filamentos estruturais usualmente flutua dentro de limites técnicos normatizados (tipicamente entre 40 mm e 60 mm), para garantir a distribuição aleatória tridimensional homogênea sem ocasionar perdas de trabalhabilidade ou o surgimento de macrovazios que sejam potencialmente prejudiciais à resistência à compressão do composto (Bitencourt Jr. *et al.*, 2019; Muniz, 2021).

3.2.2. Microfibras

Paralelamente ao desenvolvimento de reforços metálicos estruturais, a tecnologia dos compósitos cimentícios expandiu-se com a introdução de filamentos poliméricos de baixo módulo de elasticidade, projetados especificamente para atuar nos estágios iniciais de formação do esqueleto de hidratação do cimento. Cita-se, nesse contexto, as microfibras de polipropileno (100% puro) (Figura 2), cujo foco principal é a mitigação de patologias superficiais originadas antes mesmo do concreto atingir maturidade mecânica (Li, 2019).

Figura 2. Microfibras de polipropileno



Fonte: Autor (2026).

Do ponto de vista físico e reológico, incorporar microfibras do tipo monofilamentadas com comprimentos comerciais padronizados leva a alterações na dinâmica interna do concreto fresco. Esses materiais usualmente variam entre 9 mm e 12 mm, com diâmetro micrométrico fino que varia entre $9\ \mu\text{m}$ e $15\ \mu\text{m}$ e densidade em torno de $0,91\ \text{g/cm}^3$. Assim, devido a essas dimensões reduzidas e à geometria capilar, uma massa discreta de polipropileno é capaz de dispersar milhões de filamentos individuais no interior da argamassa e constituir densa rede ou malha estrutural tridimensional com altíssima área superficial específica (Muniz, 2021).

A principal vantagem técnico-científica desse sistema filamentar está na capacidade de aumentar a resistência da matriz contra a retenção tracional gerada durante a retração plástica, retração hidráulica e assentamento plástico. Nas primeiras horas pós-lançamento, a perda rápida de água por evaporação superficial induz tensões de tração capilar na pasta fresca. Nessa etapa, o concreto possui resistência mecânica praticamente nula e tende a abrir microfissuras erráticas. A presença tridimensional das microfibras intercepta essas descontinuidades embrionárias na microescala e promove o bloqueio da coalescência antes que evolua para macrofissuras ou craqueamentos visíveis (Mehta; Monteiro, 2014).

Além do controle de fissuração autógena e térmica, a literatura e os ensaios normatizados apontam melhorias físicas secundárias proporcionadas por polímeros cimentícios:

- **Resistência ao Impacto e Fadiga:** Embora possuam baixo módulo, a tenacidade intrínseca da fibra e do alongamento na ruptura elevam a capacidade de absorção de energia sob carregamentos dinâmicos e vibrações (ASTM, 2016a; ASTM, 2019).
- **Durabilidade Superficial e Desgaste:** A rede tridimensional reduz os efeitos deletérios da segregação e exsudação excessiva, de modo a manter a água de amassamento distribuída

uniformemente. Isso resulta em superfícies endurecidas mais densas, com maior resistência à abrasão e durabilidade frente a ciclos de gelo e degelo (ASTM, 2015).

- **Comportamento Frente ao Fogo e Efeito *Spalling*:** Em elevadas temperaturas (como em incêndios), o polipropileno sofre fusão térmica em torno de 160 °C a 170 °C. A volatilização dos filamentos cria microcanais interconectados no interior do concreto denso e permite o escape da pressão de vapor de água acumulada na pasta que, por vez, mitiga o fenômeno do lascamento explosivo estrutural (*spalling*) (Kalifa; Chéné; Gallé, 2001).

Apesar de manifestarem grande poder de resistência à tração e excelente compatibilidade física com o cimento, as microfibras poliméricas possuem restrições rígidas de uso que devem ser observadas no projeto estrutural. Conforme preconizado por Figueiredo (2011), devido ao ao baixo módulo de elasticidade, as microfibras de polipropileno não possuem capacidade portante pós-fissuração e, por consequência, não devem ser utilizadas para substituir nenhum tipo de reforço estrutural clássico, como armações metálicas ou macrofibras rígidas.

Ademais, a altíssima área específica tridimensional do polímero interage com a pasta e aumenta o atrito interno do esqueleto sólido, o que impõe restrições à reologia do concreto fresco. Isso gera reduções acentuadas na trabalhabilidade (como perda de abatimento), as quais não devem ser corrigidas com o incremento indiscriminado de água fresca, sob risco de diluição da matriz. A engenharia de dosagem prescreve que o travamento reológico das microfibras deve ser compensado estritamente por meio de aditivos redutores de água de alta eficiência (como os superplastificantes), para preservar a relação água/cimento original (Lucas, 2025).

Ressalta-se, ainda, que o verdadeiro potencial tecnológico desses materiais se amplia por meio do conceito de hibridização. Isto é, o uso conjunto de teores controlados de microfibras poliméricas (cujo consumo técnico ideal de projeto varia entre 300 g/m³ a 600 g/m³) atua de forma síncrona com as macrofibras de aço (arame galvanizado) e permite estabilizar as trincas superficiais e internas em todas as escalas. Enquanto o polímero elimina o microfissuramento inicial da pasta, o metal suporta as tensões mecânicas de tração estrutural no estado endurecido e confere ao concreto comportamento mecânico balanceado, durável e com alto desempenho (Bentur; Mindess, 2007).

4. METODOLOGIA

4.1. Tipo de Pesquisa

A metodologia desse trabalho foi delineada para a análise das propriedades reológicas e mecânicas de matrizes cimentícias modificadas. Pelas diretrizes do método hipotético-dedutivo, essa pesquisa classifica-se, simultaneamente, como experimental, quantitativa e comparativa e estabelece um encadeamento lógico focado em validar a viabilidade técnica da hibridização de fibras no concreto.

A natureza experimental do estudo justifica-se pela manipulação direta e laboratorial de variáveis independentes para a observação precisa dos efeitos sobre as propriedades do material sob estrito controle tecnológico. Todo o programa experimental foi conduzido nas dependências do laboratório da empresa Franco Engenharia e Geotecnia, localizado em Imperatriz – MA, que disponibilizou a infraestrutura, equipamentos e o suporte técnico necessários para a execução dos ensaios normalizados.

A abordagem quantitativa traduz todas as propriedades analisadas por meio de parâmetros numéricos absolutos, que conferiu maior robustez e precisão à análise dos dados. A coleta de dados ampara-se na quantificação exata de fenômenos físicos, tanto no estado fresco, por meio do ensaio de abatimento (*slump test*), quanto no estado endurecido, mediante a determinação da resistência à compressão axial aos 28 dias e do comportamento mecânico sob flexão.

A mensuração sistemática visou a correlação direta entre as variáveis de dosagem como o consumo de cimento, a relação água/cimento, o teor de reforço e o desempenho estrutural final do compósito, para que os resultados refletissem com fidelidade o comportamento físico do material.

Essa pesquisa também possui caráter comparativo, dado que confronta o desempenho dos concretos reforçados com diferentes teores de fibras metálicas e poliméricas, e utiliza como parâmetro de análise a estabilidade da matriz e a resistência residual.

A fundamentação teórica que baliza essa análise comparativa foi construída a partir de levantamento bibliográfico, primordialmente para o entendimento das evoluções tecnológicas do concreto reforçado com fibras e, ainda, identificar padrões de comportamento mecânico já consolidados na literatura técnica e científica.

O rigor adotado na modelagem, pautado pelas normas técnicas pertinentes da ABNT, buscou assegurar a validade dos resultados experimentais e a solidez das interpretações obtidas ao longo do desenvolvimento deste estudo.

4.2. Materiais

4.2.1. Cimento

Para definir a matriz cimentícia, adotou-se como traço de referência o concreto reforçado com fibras de aço com teor de 30 kg m^{-3} , conforme metodologia validada por Pereira [2025] e Sousa [2025]. Esse traço serviu como base experimental para avaliar o desempenho do concreto reforçado por arame galvanizado e por microfibras de polipropileno, nas mesmas condições de dosagem, para comparabilidade entre os dados. A partir deste parâmetro inicial, procedeu-se com a manipulação das variáveis independentes (Tabela 4) em que se variou o teor de aço galvanizado em 22, 26, 29,4 e 30 kg m^{-3} e o teor de microfibra de polipropileno em 0, 0,6, 4 e 8 kg m^{-3} .

Tabela 4. Design das variáveis independentes para os ensaios de compressão e tração.

TABELA DE ENSAIO			
COMPRESSÃO AXIAL			
Teor de Aço / Microfibras (kg m^{-3})	7 dias	14 dias	28 dias
0	3	3	3
30 – 0	X	X	X
29,4 – 0,6	4	4	4
26 – 4	4	4	4
22 – 8	4	4	4
TRAÇÃO NA FLEXÃO			
Teor de Aço / Microfibras (kg m^{-3})	7 dias	14 dias	28 dias
30 - 0	X	X	X
29,4 – 0,6	9	9	9
26 – 4	9	9	9
22 – 8	9	9	9
TOTAL DE CORPOS DE PROVA = 126			

Fonte: Autor (2026).

Para a confecção das matrizes cimentícias deste estudo, utilizou-se o Cimento Portland Tipo CP II-E-32, de marca comercial Poty, adquirido em um único lote comercial para mitigar variações físico-químicas intergranulares e garantir a padronização dos ensaios. A escolha do ligante foi baseada na ampla disponibilidade no mercado fornecedor da região de Imperatriz – MA e por ter características de finura, tempo de pega e evolução de resistência compatíveis com as exigências técnicas de concretos estruturais. Os dados de caracterização técnica do lote foram obtidos diretamente por meio do certificado de qualidade emitido pelo fabricante.

4.2.2. Agregado Graúdo

A Brita n.º 0, com diâmetro nominal máximo de 9,5 mm, é classificada como agregado graúdo e atende aos requisitos granulométricos estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2022. A escolha por essa granulação está relacionada a critérios de engenharia voltados à otimização do esqueleto sólido do concreto: granulometrias reduzidas permitem distribuição mais homogênea das fibras no interior da matriz e minimizam o risco de "ninhos" ou falhas de concretagem que decorrem da interferência entre os agregados e filamentos de reforço (Mehta; Monteiro, 2008).

4.2.3. Agregado Miúdo

O agregado miúdo, tecnicamente definido pela ABNT NBR 9935 como material granular de origem natural ou artificial (proveniente da britagem de rochas estáveis) cujos grãos passam na peneira de 4,75 mm e são retidos na de 0,075 mm, é um dos componentes fundamentais do concreto. Além do preenchimento de vazios, também agem como elementos lubrificantes e estabilizadores da matriz cimentícia.

No concreto fresco, o agregado miúdo preenche os espaços intersticiais entre os grãos do agregado graúdo (brita) e confere, além da segregação dos componentes, a coesão necessária para que a massa se torne trabalhável, homogênea e passível de adensamento. Não apenas atuantes na reologia, os agregados miúdos também são determinantes para a estrutura interna do concreto endurecido (Neville, 2016).

Ao envolver partículas maiores, para compor e manter a argamassa unida, esses materiais contribuem também para a redução da retração e para a mitigação de fissuras térmicas ou por secagem. A qualidade do concreto depende da distribuição granulométrica deste agregado: uma seleção adequada promove um empacotamento granular eficiente, o que reduz a necessidade de consumo de pasta de cimento e otimiza a resistência mecânica final (Mehta; Monteiro, 2014).

Assim, os agregados miúdos não são um material inerte, mas um componente ativo que define a compacidade e a durabilidade do compósito cimentício, para garantir que a matriz tenha a densidade necessária para suportar os esforços mecânicos solicitados (Neville, 2016).

4.2.4. Aditivo

Para a otimização reológica das misturas, utilizou-se o aditivo superplastificante MIRA

EMx 1230, de lote PET04743, cujo uso é amparado pela ABNT NBR 11768-1:2019. A escolha se deu pela capacidade do mesmo em reduzir o consumo de água de amassamento superior a 6% e permitir a trabalhabilidade necessária para a dispersão das fibras de aço e polipropileno sem elevar a relação a/c (Andolfato, 2002)

Conforme a ficha técnica do fabricante, o produto apresenta massa específica de 1,074 g cm⁻³ e pH de 7,41 a 25°C. Antes da incorporação à betonada, o insumo foi submetido ao processo de agitação/homogeneização exigido pela ABNT NBR 11768/12655. Ressalta-se que o aditivo é isento de íons cloreto, o que mitiga os riscos de corrosão em estruturas de concreto armado. A dosagem exata de aditivo em cada série foi ajustada experimentalmente para garantir o abatimento alvo de 8,0 a 10 cm (conforme discutido nos resultados), para assim assegurar a homogeneidade e a ausência de segregação.

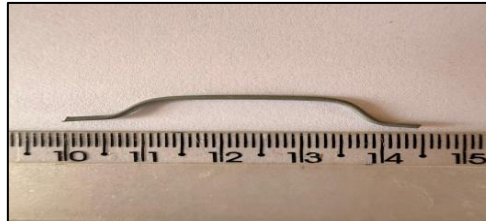
4.2.5. Fibras

Os fios de aço carbono revestidos com fina camada de zinco inibidora da ação corrosiva são utilizados na produção de fibras de aço galvanizado para proporcionar durabilidade em condições adversas. Portanto, são apropriadas para uso em concretos expostos à umidade ou substâncias químicas (Rêgo et al., 2022). No entanto, a camada de zinco diminui a rugosidade da superfície e reduz a aderência mecânica e química entre a fibra e a matriz de cimento. Essa restrição gera a demanda por tratamentos que aprimorem o entrelaçamento e ampliem a área de contato efetiva entre os materiais (Gidrão et al., 2021).

A geometria, a rugosidade e a interação química são os três fatores principais que afetam o comportamento da fibra no concreto. Fibras com superfície lisa e baixa fricção geralmente deslizam com mais facilidade e retraem o aumento da resistência após a fissuração. Por outro lado, as superfícies tratadas ou ancoradas melhoram a resistência ao arrancamento (*pull-out*) e aumentam a capacidade de absorver de energia do compósito (Quissanga & Pimentel, 2019).

Para compor o reforço da matriz cimentícia, empregou-se dois tipos de fibras: microfibras sintéticas de polipropileno e macrofibras metálicas (produzidas de forma artesanal a partir de arame galvanizado) (Figura 3). As microfibras de polipropileno, da marca Propfiber, possuem diâmetro entre 13 e 15 microns e comprimento nominal de 12 mm. São utilizadas para a redução da retração plástica e controle de microfissuras superficiais para criar uma estrutura tridimensional que eleva a resistência ao impacto e a tenacidade do concreto.

Figura 3. Macrofibra artesanal de aço galvanizado



Fonte: Autor (2026).

As macrofibras metálicas foram confeccionadas a partir de arame galvanizado da marca Sigma Power (modelo BWG 18), com diâmetro nominal de 1,24 mm. A seleção baseou-se na proteção contra a corrosão proporcionada pela galvanização, que garante mais durabilidade ao compósito em ambientes expostos à umidade.

O processo de produção consistiu na secção manual do arame em comprimentos de 50 mm a 55 mm, com uso de gabaritos para padronização, seguido pela execução de dobras de 5 mm nas extremidades para ancoragem mecânica (ABNT, 2019), que normatiza as fibras de aço para concreto. A conformação final, com comprimento útil de 45 mm a 50 mm, respeitou o critério normativo de não exceder o dobro da dimensão máxima do agregado graúdo utilizado, para assegurar homogeneidade da mistura e eficácia da ancoragem dentro da matriz cimentícia.

4.3. Métodos

4.3.1. Confeção do Concreto de Referência - ABCP

A definição das proporções dos constituintes do concreto de referência, bem como das matrizes destinadas à posterior hibridização com fibras, foi realizada por meio do método de dosagem experimental proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), que trata-se de um procedimento sistemático, amplamente consolidado no meio técnico-científico e de comprovada eficácia no controle das propriedades tecnológicas de compósitos cimentícios, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

O objetivo desta etapa foi determinar um traço em massa que assegurasse as metas de resistência mecânica à compressão e de trabalhabilidade estipuladas no escopo do projeto, para obter o consumo otimizado de ligante e agregados. O roteiro de dosagem preliminar da ABCP foi iniciado a partir do estabelecimento da resistência média requerida à compressão aos 28 dias

(f_{c28}), calculada a partir da margem de controle estabelecida pela norma ABNT NBR 12655 de 2022, ao correlacionar a resistência característica de projeto (f_{ck}) ao desvio-padrão associado às condições de preparo do material em laboratório.

Com a tensão de dimensionamento, utilizou-se a curva de Abrams para estimar a relação água/cimento (a/c) adequada para o cimento Portland adotado e definir o limite máximo de água livre capaz de garantir o desempenho mecânico alvo. Em sequência, estimou-se a demanda de água de amassamento por m^3 de concreto em função da consistência reológica requerida em estado fresco, por vez medida experimentalmente em ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), com o diâmetro máximo característico do agregado gráúdo disponível. Após obter os parâmetros de volume de água e da relação a/c devidamente consolidados, calculou-se a massa necessária de cimento por unidade de volume.

Por fim, a quantificação dos agregados miúdos e graúdos foi delineada a partir do volume seco compactado do agregado gráúdo obtido por meio do módulo de finura da areia e da massa unitária da brita, em que se preencheu o volume restante da mistura com agregado miúdo para atender à lei das fatias volumétricas (Autor, 2026). Este traço base derivado do método ABCP serviu como matriz de controle (concreto branco) e como referencial analítico para a posterior introdução e substituição volumétrica das frações de arame galvanizado e microfibras de polipropileno, cujos ajustes reológicos foram refinados por meio do emprego de aditivos superplastificantes.

4.3.2. Caracterização dos Agregados

4.3.2.1. Granulometria

A caracterização física voltada à determinação da distribuição dimensional das partículas dos agregados miúdos e graúdos seguiu os preceitos normativos estabelecidos pela ABNT NBR 7211 de 2022. A compreensão da curva granulométrica dos materiais é requisito indispensável para o desenvolvimento de concretos de alto desempenho, pois a distribuição dos diâmetros dos grãos dita o grau de empacotamento do esqueleto mineral que, por vez, afeta as propriedades reológicas da mistura fresca e a eficiência mecânica da matriz endurecida reforçada com fibras.

Como etapa preliminar e preparatória para o ensaio, as amostras coletadas em campo necessitavam de tratamento para a eliminação da umidade interna. Neste trabalho optou-se por realizar um processo de secagem natural. Para tanto, os agregados foram dispostos em bandejas e expostos à radiação solar por vários dias consecutivos, submetidos a revolvimentos periódicos

manuals para garantir secagem homogênea até que atingissem condição de massa constante e aptidão para fracionamento técnico.

Após secos à temperatura ambiente, fez-se a redução e preparação das porções de ensaio. Para que a subamostra final retivesse a representatividade estatística do lote original, utilizou-se repartidor mecânico de amostras para a condução do processo de quarteamento, que dividiu o volume em porções simétricas e homogêneas (Figura 4), para cumprir os parâmetros fixados pela legislação técnica vigente.

Figura 4. Separador de amostras e quarteamento do agregado graúdo



Fonte: Autor (2026).

O aparato metodológico empregado na rotina de ensaio envolveu o uso de balança técnica com precisão de 0,1g, bandejas metálicas para manuseio, escovas de cerdas macias para a limpeza cuidadosa das telas e o conjunto padronizado de peneiras pertencentes às séries normal e intermediária.

Para o agregado miúdo (areia natural), foram selecionadas as peneiras com aberturas de 9,5mm (3/8"), 4,8 mm (Nº 4), 2,4 mm (Nº 8), 1,2 mm (Nº 16), 0,6 mm (Nº 30), 0,3 mm (Nº 50) e 0,15 mm (Nº 100). Já para o agregado graúdo (Brita 0), empregaram-se as malhas de 12,7 mm (1/2"), 9,52 mm (3/8"), 6,38 mm (1/4"), 4,76 mm (Nº 4) e 2,38 mm (Nº 8), acopladas a um fundo coletor estanque (Figura 5).

Figura 5. Peneiras com diferentes aberturas para separação granulométrica



Fonte: Autor (2026).

O procedimento operativo consistiu no posicionamento vertical das peneiras em ordem decrescente de abertura para verter a massa quarteada no topo. O conjunto foi submetido a agitação manual vigorosa e bidirecional, para promover movimentação contínua das partículas sobre as malhas em que apenas os grãos com dimensões inferiores às aberturas transitassem para os níveis subsequentes.

Ao final do ciclo de peneiramento, pesou-se as frações retidas individualmente em cada peneira, bem como o material pulverulento depositado no fundo receptor. A quantificação dessas massas permitiu o cálculo analítico dos percentuais de retenção simples e acumulada por faixa granulométrica. O cálculo do Módulo de Finura (MF) e da Dimensão Máxima Característica (DMC) foi realizado conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), para fornecer os subsídios necessários à plotagem das curvas de distribuição granulométrica e para o cálculo exato do consumo de agregados pelo método ABCP.

4.3.2.2. Massa Específica Aparente

4.3.2.2.1. Agregado Miúdo

A determinação da massa unitária no estado solto (ou massa específica aparente) do agregado miúdo seguiu as diretrizes e prescrições técnicas da norma ABNT NBR 16972:2021. Ao contrário do ensaio de massa específica real obtido pelo frasco de Chapman (Figura 6), que isola exclusivamente a densidade do grão mineral, a determinação da massa unitária quantifica a relação entre a massa do agregado e o volume total ocupado, o que inclui de forma integral os espaços vazios intergranulares do arranjo natural das partículas soltas. O conhecimento exato deste índice tem relevância prática na tecnologia dos concretos, pois permite realizar de maneira precisa a conversão dos traços calculados em massa para proporções volumétricas equivalentes, parâmetro importante para o fracionamento operacional dos materiais.

Figura 6. Frasco de Chapman para ensaios de densidade do grão mineral



Fonte: Autor (2026).

O aparato experimental consistiu em uma balança eletrônica técnica com resolução de 0,1 g, uma régua metálica rígida utilizada para o nivelamento superficial da amostra e um recipiente cilíndrico metálico rígido, provido de alças laterais e volume interno conhecido, previamente calibrado por meio do preenchimento com água destilada à temperatura ambiente. O lote de areia natural utilizado no ensaio foi previamente submetido ao processo de secagem natural por exposição solar direta ao longo de vários dias para eliminação da umidade livre e prevenção de inchamento, o qual altera artificialmente o volume aparente do material granular.

O procedimento operativo iniciou-se com a pesagem do recipiente cilíndrico limpo e seco para a determinação de sua massa própria (tara), registrado para controle. Na sequência, a areia seca foi vertida cuidadosamente no interior do cilindro com o auxílio de uma concha manual, mantida a uma altura de queda livre constante de aproximadamente 10 cm em relação ao topo do molde. Esse cuidado metodológico foi adotado para evitar qualquer tipo de compactação ou adensamento dinâmico induzido na massa, para que o agregado se acomodasse exclusivamente sob a ação da gravidade e simulasse o estado solto de estocagem.

Executou-se o preenchimento do recipiente até a ultrapassagem sutil da borda superior do cilindro. Procedeu-se, em sequência, com o rasgamento superficial (deslize da régua metálica de forma transversal sobre a seção de topo do molde), em que os movimentos foram realizados com leve inclinação da lâmina para remover o excesso de grãos e aplainar a superfície da areia, nivelada às bordas nominais do cilindro metálico. Partículas aderidas externamente ao aparato foram cuidadosamente removidas com o auxílio de uma escova de cerdas macias.

Posteriormente, o cilindro preenchido com a areia no estado solto foi posicionado sobre o prato da balança técnica para a aferição da massa conjunta (recipiente + agregado). A massa líquida da areia solta (M_a) foi obtida por meio da subtração direta entre o peso bruto total e a tara do cilindro previamente registrada. A massa unitária no estado solto (ρ_s) foi determinada pela razão direta entre a massa líquida obtida e o volume interno útil do recipiente cilíndrico (V_c) conforme expresso matematicamente pela **Eq. 1**:

$$\rho_s = \frac{M_a}{V_c} \quad (\text{Eq. 1})$$

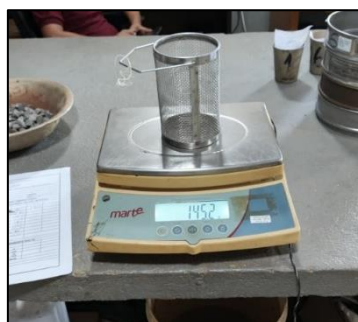
O valor final obtido nos ensaios laboratoriais expressa a massa em quilogramas necessária para preencher 1 m³ de espaço físico (kg m⁻³). Essa medida foi integrada ao banco de dados reológicos da pesquisa e serviu como ferramenta de cálculo para correlacionar a compacidade

granulométrica da areia com os consumos de cimento e agregados calculados pelo método ABCP para a produção dos concretos modificados com fibras híbridas.

4.3.2.2.2. Agregado Graúdo

A caracterização da massa específica do agregado graúdo (Brita 0) foi delineada a partir do método de pesagem hidrostática com o auxílio do cesto aramado imerso (ABNT NBR NM 53, 2009) (Figura 7). Aferiu-se o peso do cesto metálico ao ar (145,2 g) e da respectiva massa quando totalmente imerso em água (127,9 g), para correção de empuxo do aparato.

Figura 7. Cesto metálico para a realização do ensaio



Fonte: Autor (2026).

Uma amostra representativa de 1 kg de brita seca foi posta no cesto e pesada conjunta ao ar (1145,2 g). Em seguida, acoplou-se o conjunto com o agregado graúdo à balança hidrostática totalmente submerso no tanque de água, para registro da leitura de massa imersa combinada de 764,9 g. Pela dedução do peso próprio do cesto imerso, determinou-se a massa líquida do agregado confinado na condição submersa (638,7 g).

A aplicação dos princípios do Teorema de Arquimedes sobre a diferença entre o peso seco e o peso submerso revelou um volume real deslocado de $362,3 \text{ cm}^3$ para o lote de agregado graúdo analisado. A razão direta entre a massa seca da amostra e o respectivo volume de grãos resultou em densidade real de $2,721 \text{ g cm}^{-3}$ para a brita 0. Ambos os índices de massa específica obtidos nos ensaios foram arquivados e integrados às equações de balanço volumétrico do método ABCP para a composição dos traços híbridos.

4.3.2.2.3. Massa Unitária

A investigação das propriedades físicas dos agregados estendeu-se à determinação da massa unitária (ABNT NBR 16972, 2021). Do ponto de vista conceitual, este ensaio estabelece a relação direta entre a massa de um agregado e o volume bruto do recipiente que o acondiciona,

computado no cálculo não apenas o volume das partículas sólidas, mas ainda a fração de vazios preenchidos por ar que se formam nos interstícios do esqueleto granular.

O conhecimento desses índices é uma premissa fundamental para a correta aplicação do método de dosagem da ABCP, uma vez que a massa unitária compactada atua diretamente no cálculo do consumo em massa do agregado graúdo por m^3 de concreto. Para conferir robustez analítica ao estudo, o ensaio foi segmentado em duas condições distintas de arranjo estrutural: o estado solto e o estado compactado.

O aparato instrumental mobilizado para a execução das rotinas laboratoriais compreendeu uma balança eletrônica com resolução de 0,1 g, uma concha metálica cilíndrica para o manuseio e derramamento dos minerais, uma régua de aço rígida destinada ao rasgamento superficial, haste metálica cilíndrica padronizada com ponta semiesférica para o adensamento mecânico, além de recipiente cilíndrico metálico rígido e estanque.

Este recipiente foi previamente calibrado por meio do preenchimento com água destilada a temperatura controlada, para determinar geometricamente o seu volume interno útil em 4571 cm^3 (equivalente a $0,004571 \text{ m}^3$) e tara estrutural de 4,750 kg. As amostras de brita 0 foram previamente submetidas a secagem natural por exposição solar prolongada nas dependências externas do laboratório, para garantir a eliminação da água livre intersticial antes do início das pesagens.

A primeira etapa consistiu na determinação da massa unitária no estado solto, que busca simular o arranjo espacial do agregado quando depositado livremente em baias ou pilhas de estocagem. Para tanto, preencheu-se o recipiente calibrado pelo vertimento de brita 0 de forma contínua com o auxílio da concha manual, mantida a uma altura de queda livre constante de aproximadamente 10 cm em relação à borda superior do molde. Esse controle foi rigorosamente mantido para impedir que a energia de impacto gerasse qualquer adensamento artificial dos grãos basálticos.

Fez-se o preenchimento até o transbordo sutil do agregado, então imediatamente nivelado superficialmente com o deslize suave da régua metálica sobre o topo do cilindro, para remoção do excesso. Após a limpeza externa das paredes do recipiente, o conjunto foi posicionado na balança para o registro da massa bruta. O procedimento foi repetido em três amostras distintas para a obtenção de uma média estatística confiável.

Na sequência, determinou-se a massa unitária no estado compactado, metodologia que força o rearranjo mecânico dos grãos para atingir a condição de máxima compacidade e menor índice de vazios intergranulares (simula o efeito do adensamento por vibração nas fôrmas de

concreto). Assim, o preenchimento do recipiente cilíndrico foi processado em três camadas sucessivas e de volumes aproximadamente iguais (Figura 8).

Figura 8. Pesagem da brita sem compactação e com compactação



Fonte: Autor (2026).

Seguiu-se com o adensamento mecânico padronizado por meio de exatamente 25 golpes uniformemente distribuídos na seção transversal com uma haste metálica de ponta semiesférica. Durante a compactação da 1ª camada, evitou-se o choque da haste contra o fundo do molde; nas camadas subsequentes, calibrou-se a força do impacto para penetrar sutilmente o topo da camada inferior e intertravar a matriz granular. Após adensada a 3ª camada, fez-se o rasgamento e nivelamento superficial com a régua metálica, seguido da pesagem do cilindro preenchido, e a réplica do ensaio em quatro amostras independentes para fins de controle de dispersão.

Para ambas as condições de ensaio, os valores da massa unitária (γ) foram determinados analiticamente pela razão entre a massa líquida do agregado (calculada pela diferença entre a massa total medida, M_2 , e a tara do recipiente, M_1) e o volume nominal calibrado do cilindro metálico (V), conforme estabelecido na **Eq. 2**:

$$\gamma = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (\text{Eq. 2})$$

Os resultados derivados desse cálculo expressaram o comportamento densitométrico aparente da Brita 0 nas condições solta e compactada. Os dados foram devidamente tabulados e arquivados para fundamentar a discussão sobre a capacidade de empacotamento do agregado gráúdo e para alimentar as equações estequiométricas do método ABCP no capítulo de dosagem do concreto modificado com fibras.

4.3.3. Slump test

A norma ABNT NBR 16889:2020 estabelece os procedimentos necessários para verificar a trabalhabilidade do concreto utilizando o ensaio de Slump test. Primeiro, obteve-se amostra apropriada do concreto fresco e escolhido uma superfície plana para a realização do teste. Sobre essa base, colocou-se o molde troncocônico, com medidas: altura de 30 cm, diâmetro inferior de 20 cm e diâmetro superior de 10 cm (Figura 9).

Figura 9. Preenchimento do cone de *slump test*



Fonte: Autor (2026).

O enchimento do molde foi executado em três níveis diferentes com cerca de 10 cm cada. Em cada camada, aplicou-se 25 golpes de adensamento com uma haste metálica de 16 mm de diâmetro. Após o preenchimento, o molde foi removido com a base de menor diâmetro voltada para baixo. Então, mediu-se a diferença entre a altura original do molde e a altura do concreto abatido, conhecido como abatimento ou slump. Por fim, para verificar os limites técnicos estipulados para trabalhabilidade, comparou-se o resultado ao valor determinado para o tipo de concreto em questão.

4.3.4. Moldagem dos Corpos de Prova

4.3.4.1. Ensaio de Resistência a Compressão

As especificações e os procedimentos para os testes de compressão axial em corpos de prova de concreto são definidos pela norma ABNT NBR 5739:2018. Antes do ensaio, limpa-se e seca-se o corpo de prova e as faces dos pratos da prensa. Com uso de círculos concêntricos como referência para o alinhamento e o sentido de moldagem, posicionou-se o corpo de prova no centro do prato inferior (Figura 10). Pela possibilidade de desgaste da superfície por abrasão durante a moldagem e cura, define-se claramente o início e o fim do corpo de prova.

Figura 10. Corpo de prova cilíndrico na máquina de ensaio



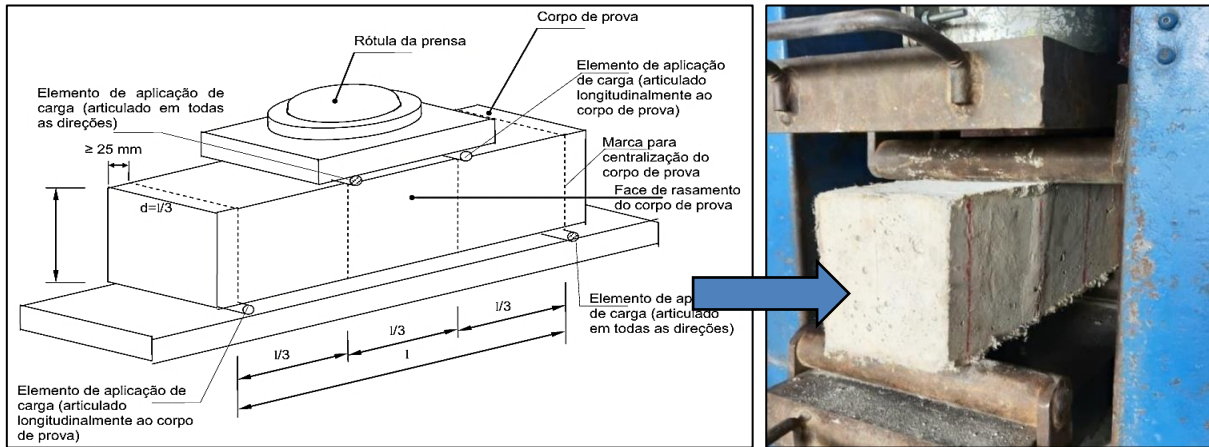
Fonte: Autor (2026).

A escala de força empregada no equipamento deve possibilitar que a quebra do corpo de prova aconteça dentro do período de calibração da máquina. O carregamento deve ser realizado de maneira constante, uniforme e ininterrupta, para manter a velocidade de aplicação da carga de $(0,45 \pm 0,15) \text{ MPa s}^{-1}$ até a ruptura. Para garantir a precisão dos resultados, essa taxa de carregamento deve permanecer inalterada ao longo de todo o ensaio.

4.3.4.2. Ensaio de Resistência a Tração na Flexão

Realizou-se o ensaio de resistência à tração na flexão em máquina universal de ensaios, equipada com dispositivos específicos para a aplicação de carga em quatro pontos, de acordo com os requisitos da ABNT NBR 12142:2010. A estrutura de suporte utilizada, com dimensões de 20 x 40 cm, foi preparada com marcações precisas nos pratos inferior e superior (50 mm e 150 mm, respectivamente) para garantir o alinhamento dos dispositivos de apoio, fixados com auxílio de alicate de pressão para evitar instabilidades durante o carregamento (Figura 11).

Figura 11. Características da norma ABNT NBR 12142:2010 para os ensaios de resistência à tração na flexão e ilustração dos testes com corpo de prova



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 12142 (2010) e Autor (2026).

O corpo de prova prismático foi posicionado sobre dois apoios circulares para manter um vão livre de 30 cm. A configuração de ensaio em quatro pontos foi assegurada pela aplicação de carga através de dois roletes carregadores, posicionados a um terço da distância entre os apoios. A aplicação da carga foi contínua e progressiva, sem a incidência de choques, para manter uma velocidade constante entre $0,05 \text{ MPa s}^{-1}$ e $0,1 \text{ MPa s}^{-1}$, até ocorrer a ruptura. Para determinar o parâmetro de resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$), utilizou-se a **Eq. 3**:

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

- $f_{ct,f}$: resistência à tração na flexão (MPa);
- F : força máxima registrada na máquina de ensaio (kN);
- l : vão entre apoios (mm);
- b : largura média da seção transversal do corpo de prova (mm);
- d : altura média da seção transversal do corpo de prova (mm).

A precisão do posicionamento se deu por marcações feitas com esquadro e régua em ambas as faces dos corpos de prova, para interligar os pontos de apoio e aplicação de carga com giz de cera, conforme o protocolo experimental estabelecido. A norma ABNT NBR 16940:2021 define que as amostras destinadas ao teste devem ser retiradas da cura entre 24 horas e 3 horas antes do início do ensaio, que normalmente é executado aos 28 dias de idade do concreto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Composição Granulométrica dos Agregados

A caracterização física da areia natural utilizada na pesquisa seguiu rigorosamente os parâmetros de distribuição de tamanho de grãos estabelecidos pela norma ABNT NBR NM 248 (2003) (Tabela 5). Este procedimento é fundamental para o desenvolvimento do traço, em que distribuição dimensional das partículas afeta diretamente a compacidade da matriz, a demanda por água livre e, por consequência, a reologia do concreto fresco modificado com fibras.

Tabela 5. Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo.

Peneiras (mm)	Série Normal	Série Intermediária	Peso da Amostra (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)
75	-	0,0	0,00	0,0	
-	63	-	0,0	0,00	0,0
-	50	-	0,0	0,00	0,0
37,5	-	0,0	0,00	0,0	
-	31,5	-	0,0	0,00	0,0
-	25	-	0,0	0,00	0,0
19	-	0,0	0,00	0,0	
-	12,5	-	0,0	0,00	0,0
9,5	-	0,0	0,00	0,0	
-	6,3	3,3	0,77	0,77	0,77
4,75	-	3,5	0,82	1,59	2,36
2,36	-	13,2	3,10	4,69	7,05
1,18	-	21,3	5,00	9,69	16,74
0,6	-	38,6	9,07	18,76	35,50
0,3	-	149,8	35,19	53,95	89,45
0,15	-	185,1	43,48	97,43	97,43
-	0,075	-	0,0	0,00	97,43
-	FUNDO	-	10,5	2,47	100,00
TOTAL			425,7	100,00	
Caracterização					
MF	1,86				
DMC	2,36 mm				

Fonte: Autor (2026).

A partir da análise granulométrica do agregado miúdo apresentada na Tabela 5, observa-se que a areia utilizada neste estudo apresentou maior concentração de partículas retidas nas peneiras de 0,30 mm e 0,15 mm, o que indica predominância de grãos finos. O módulo de finura obtido foi de $MF = 1,86$ e, de acordo com os limites estabelecidos pela norma ABNT NBR

7211 (2022), esse valor define a areia na região inferior de granulometria e caracteriza-se como areia fina. Verificou-se uma distribuição granulométrica contínua, pouca retenção nas peneiras de maiores aberturas e maior acúmulo de material nas peneiras intermediárias e finas.

Esse comportamento influencia diretamente as propriedades do concreto no estado fresco, o que pode aumentar a coesão da mistura, reduzir a segregação e elevar a demanda de água e aditivo superplastificante para manter a trabalhabilidade. Para o diâmetro máximo característico (DMC), obteve-se um valor de 2,36 mm. Os valores de MF e DMC para os agregados miúdos demonstram que a areia possuía granulometria fina e adequada para utilização no concreto estudado, embora tais características exigissem ajustes no traço, principalmente o aumento da proporção de agregado miúdo e o controle do consumo de água, para manter não apenas a trabalhabilidade almejada, mas o desempenho mecânico do concreto reforçado com fibras. Para determinar a granulometria do agregado graúdo, adotou-se o método estabelecido pela ABNT NBR 7211 (2022) para padronização dos resultados obtidos (Tabela 6).

Tabela 6. Resultados do ensaio de granulometria do agregado graúdo.

Peneiras (mm)	Série Normal	Série Intermediária	Peso Retido (g)	Retida (%)	Retida Acumulada (%)
75	-	0,0	0,00	0,00	
-	63	-	0,0	0,00	0,00
-	50	-	0,0	0,00	0,00
37,5	-	0,0	0,00	0,00	
-	31,5	-	0,0	0,00	0,00
-	25	-	0,0	0,00	0,00
19	-	0,0	0,00	0,00	
-	12,5	0,0	0,00	0,00	
9,5	-	223,9	6,03	6,03	6,03
-	6,3	-	1693,6	45,60	51,63
4,75	-	987,0	26,57	26,57	78,20
2,36	-	662,6	17,84	17,84	96,04
1,18	-	0,0	0,00	0,00	96,04
0,6	-	0,0	0,00	0,00	96,04
0,3	-	0,0	0,00	0,00	96,04
0,15	-	0,0	0,00	0,00	96,04
-	0,075	-	0,0	0,00	96,04
-	FUNDO	-	147,4	3,96	100,00
TOTAL			3714,5	100,00	
Caracterização					
MF	5,62				
DMC	9,5 mm				

Fonte: Autor (2026).

A caracterização granulométrica do agregado graúdo, apresentada na Tabela 6, revela um perfil de graduação compatível com a Brita 0, com um Diâmetro Máximo Característico (DMC) de 9,5 mm. A análise da distribuição das frações retidas demonstra concentração significativa na peneira de 6,3 mm, responsável por 45,60% da massa total do agregado, com uma retenção acumulada de 51,63% nesta fração.

A predominância de partículas entre 4,75 mm e 9,5 mm é um fator determinante para o comportamento reológico do concreto no estado fresco, especialmente em sistemas reforçados com fibras metálicas e poliméricas. A utilização de um DMC reduzido (9,5 mm) é estratégica para a hibridização das fibras, visto que agregados graúdos de dimensões menores minimizam o efeito de "parede" (*wall effect*) e reduzem a interferência física entre os grãos de brita e os filamentos de reforço durante a concretagem (Figueiredo, 2011).

A curva granulométrica obtida favorece uma distribuição mais homogênea das fibras no interior da matriz cimentícia e mitigou o risco de formação de nichos de concretagem ou o agrupamento indesejado dos filamentos (*balling effect*). Ainda, a proporção de finos encontrada na brita (fração retida no fundo) contribui para o preenchimento dos vazios do esqueleto graúdo, que auxilia na coesão da mistura. O perfil granulométrico obtido, aliado ao módulo de finura do agregado miúdo, justificou a estabilidade e trabalhabilidade do traço experimental definido, e assegurou uma matriz cimentícia com viscosidade ideal para envolver a superfície específica das fibras para os mecanismos de *bridging* (ponte) nas zonas de microfissuração.

5.2. Massa Específica

Realizou-se a determinação da massa específica real do agregado graúdo (Brita 0) de acordo com a norma ABNT NBR NM 53:2009, por meio do método do cesto imerso em água. Esse ensaio é relevante no controle tecnológico dos constituintes do concreto, pois a densidade real do agregado interfere diretamente no cálculo do rendimento do traço, no empacotamento das partículas, no índice de vazios e, por conseguinte, na trabalhabilidade da mistura fresca e no consumo final de ligante. O ensaio baseia-se no princípio de Arquimedes para mensurar o volume de fluido deslocado pela estrutura sólida do material por meio da pesagem hidrostática (ABNT, 2009). Os dados do experimento encontram-se compilados na Tabela 7.

Tabela 7. Dados experimentais do ensaios para massa específica dos componentes.

Parâmetro de Ensaio	Identificação Comercial / Física	Valor
<i>Peso do cesto ao ar</i>	P1	145,5 g
<i>Peso do cesto mais o agregado ao ar</i>	P2	1146,9 g
<i>Peso do agregado seco (P2 - P1)</i>	P3	1001,4 g
<i>Peso do cesto imerso em água</i>	P4	126,2 g
<i>Peso do cesto imerso mais o agregado</i>	P5	759,6 g cm ⁻³
<i>Peso do agregado imerso (P5 - P4)</i>	P6	633,4 g cm ⁻³
<i>Volume de água deslocado (P3 - P6)</i>	P7	368,0 cm ³
Massa específica real resultante		2,721 g cm⁻³

Fonte: Autor (2026).

Nota: Temperatura da água controlada a 28,4 °C.

Para a obtenção do resultado analítico da massa específica real (ρ), fez-se a razão entre a massa do agregado seco (P3) e o volume real ocupado (P7), em que se desconsiderou os poros permeáveis, do qual se obteve o valor de 2,721 g cm⁻³ ou equivalentemente 2721 kg m⁻³. O valor obtido situa-se no intervalo entre 2,60 g cm⁻³ e 2,80 g cm⁻³, que caracteriza os agregados graúdos de origem basáltica ou granítica de alta qualidade para uso na construção civil.

Do ponto de vista microestrutural, esse índice atesta que a Brita 0 utilizada exibiu elevada compacidade, baixa porosidade interna e reduzida capacidade de absorção de água livre. Na prática da dosagem, essas propriedades físicas conferiram ótima estabilidade a relação a/c, uma vez que o agregado não absorveu a água destinada à hidratação do cimento Portland e favoreceu o empacotamento de grãos. Desse modo, mitigou-se a segregação das macrofibras metálicas e assegurou-se o ganho esperado de resistência mecânica à compressão axial e à tração na flexão do compósito endurecido.

5.3. Massa Unitária

Realizou-se a determinação da massa unitária do agregado graúdo, no estado solto e no estado compactado, em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 16972:2021. Essa propriedade é fundamental para caracterização tecnológica de materiais destinados à produção de concreto, especialmente no método de dosagem da ABCP, pois permite a conversão adequada de frações de massa para volume e fornece dados essenciais para a otimização do esqueleto sólido. Para o cálculo analítico da massa unitária (γ), aplicou-se a equação fundamental que relaciona a massa líquida média obtida das amostras (m) e o volume nominal do recipiente de ensaio (V), conforme expresso matematicamente pela **Eq. 4**:

(Eq. 4)

$$\gamma = \frac{m}{V}$$

Onde:

γ = massa unitária do agregado (kg m^{-3});

m = massa líquida média do agregado (kg);

V = volume interno do recipiente (m^3).

Do ponto de vista conceitual, a massa unitária traduz a relação entre a massa do agregado e o volume total do recipiente que o contém, em que se computa os poros internos das partículas e os vazios intergranulares existentes entre os grãos. O controle desses índices é determinante para a prevenção da compacidade do compósito, a quantidade consumida de pasta cimentícia e o comportamento reológico da mistura fresca.

Os parâmetros geométricos do recipiente calibrado utilizado como base para os ensaios laboratoriais compreenderam um peso de 4,750 kg e volume útil interno de 7571 cm^3 , o que equivale geometricamente a $0,007571 \text{ m}^3$. Os dados brutos aferidos nas balanças eletrônicas para as determinações experimentais encontram-se sumarizados na Tabela 8.

Tabela 8. Experimentos para determinação da massa unitária dos agregados graúdos.

Condição do Agregado	Amostra	Massa Total (Recipiente + Agregado) (kg)	Massa Líquida do Agregado (kg)	Massa Média Resultante (kg)	Massa Unitária Final (kg m^{-3})
Solto	1	15,410	10,660	10,657	1407,48
	2	15,420	10,670		
	3	15,390	10,640		
Compactado	1	16,220	11,470	11,505	1519,61
	2	16,190	11,440		
	3	16,330	11,580		
	4	16,280	11,530		

Fonte: Autor (2026).

No estado solto, em que lança-se o material na forma livre e sem adensamento para simular o armazenamento em canteiro, a massa unitária resultante foi na ordem de $1407,48 \text{ kg m}^{-3}$. Na condição compactada, em que o agregado é submetido ao adensamento mecânico em camadas por meio de haste padronizada, promoveu-se maior rearranjo e acomodação dos grãos, com massa unitária resultante de $1519,61 \text{ kg m}^{-3}$.

A análise comparativa entre as duas condições revelou incremento de aproximadamente: $1519,61 - 1407,48 = 112,13 \text{ kg m}^{-3}$ na densidade aparente do agregado após compactação, o que evidencia a redução dos vazios intergranulares e melhor acomodação das partículas da

Brita 0. Assim, os resultados obtidos demonstram comportamento compatível com agregados graúdos utilizados em concretos convencionais e indicou a capacidade de empacotamento e boa distribuição granulométrica do material.

Para o desenvolvimento do concreto reforçado com fibras, a utilização de um agregado com essas características mostrou-se vantajosa, pois a redução dos vazios contribui para melhor envolvimento dos grãos pela pasta cimentícia e favoreceu a coesão da mistura que, por vez, também reduziu tendências à segregação.

Além disso, o adequado empacotamento do agregado graúdo auxiliou na estabilidade da matriz cimentícia durante a incorporação das fibras metálicas e microfibras de polipropileno, que contribuiu para melhor dispersão dos filamentos no interior do concreto e proporcionou maior uniformidade ao compósito endurecido.

5.4. Dosagem ABCP

Definiu-se as proporções dos materiais constituintes do concreto experimental com base no método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), amplamente utilizado na determinação de traços para concretos convencionais. O método fundamenta-se na correlação entre as propriedades físicas dos agregados, a trabalhabilidade desejada no estado fresco e o desempenho mecânico esperado no estado endurecido.

No presente estudo, o método foi adaptado às condições específicas dos materiais utilizados, principalmente pela incorporação de fibras de aço galvanizado e pela substituição parcial por microfibras de polipropileno, pois a presença desses filamentos altera características como trabalhabilidade e a coesão do concreto.

Inicialmente, definiu-se a resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias (f_{ck}), em que adotou-se o valor de 25MPa, visto que é compatível com os concretos estruturais convencionais empregados em elementos submetidos a moderadas solicitações mecânicas. Em seguida, calculou-se a resistência média necessária do concreto (f_{cm}), dada a variabilidade natural do processo de produção e conforme recomendações da ABNT NBR 12655:2022. Para condição de preparo B, adotou-se desvio-padrão (s_d) igual a 5,5Mpa e utilizou-se a expressão apresentada na **Eq. 5**:

$$f_{cm} = f_{ck} + 1,65 \cdot s_d \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

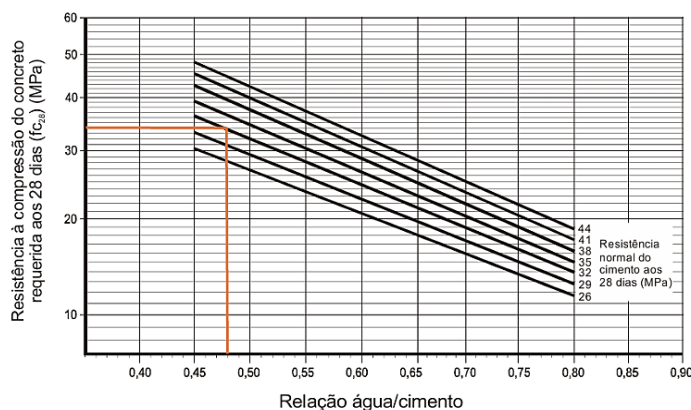
f_{cm} = resistência média à compressão (MPa);

f_{ck} = resistência característica do concreto (MPa);

s_d = desvio-padrão de dosagem (MPa).

Ao substituir os valores na expressão, obteve-se o valor de 34,08 MPa e, então, estimou-se a relação a/c pela curva de Abrams (Figura 12), no qual resultou em $a/c = 0,48$.

Figura 12. Curva de Abrams para determinação da relação a/c



Fonte: Adaptado de Assunção (2002).

Escolheu-se esse valor de a/c por proporcionar equilíbrio entre resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade do concreto. Em seguida, definiu-se a consistência desejada por meio de ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) e estabeleceu-se abatimento entre 80 mm e 100 mm, uma faixa considerada adequada para concretos reforçados por fibras, que permite boa trabalhabilidade sem a ocorrência excessiva de segregação.

Considerados a faixa de abatimento especificada e o diâmetro máximo característico do agregado graúdo (DMC = 9,5 mm) correspondente à Brita 0, adotou-se consumo de água de amassamento (C_a) igual a 200 L m^{-3} . Calculou-se o consumo de cimento (C_c) a partir da relação a/c definida, como demonstrado pela **Eq. 6**, em que obteve-se um valor de aproximadamente 417 kg m^{-3} .

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

C_c = consumo de cimento por metro cúbico (kg m^{-3});

C_n = consumo de água (L m^{-3});

a/c = relação água/cimento.

Na sequência, realizou-se a determinação das proporções dos agregados com base nos resultados de caracterização granulométrica obtidos experimentalmente. A areia apresentou módulo de finura (MF) de 1,86 (areia fina, de acordo com os limites da NBR 7211:2022). Já a

Brita 0 apresentou granulometria contínua, porém com presença significativa de material fino nas peneiras inferiores, que influenciou diretamente a trabalhabilidade do concreto.

Inicialmente, pelo uso dos parâmetros teóricos tradicionais do método ABCP, observou-se tendência de obtenção de traço pobre em argamassa, inadequado para concretos reforçados com fibras. Portanto, tal condição favoreceria a segregação dos materiais e a ocorrência do fenômeno conhecido como "fiber balling effect", caracterizado pelo embolamento das fibras durante a mistura. Assim, optou-se pela realização de ajuste experimental no traço, dado o MF da areia, o comportamento real observado durante as betonadas, os resultados do slump test e a necessidade de melhor envolvimento das fibras pela pasta cimentícia.

Após os devidos ajustes experimentais, definiu-se o seguinte traço unitário em massa: 1:1,44:2,02:0,48, em que 1 = cimento, 1,44 = areia, 2,02 = brita 0 e 0,48 = relação a/c. Pelo consumo de cimento calculado anteriormente ($\cong 417 \text{ kg m}^{-3}$), determinou-se os consumos dos demais materiais utilizados no experimento por m^3 : (i) consumo de agregado miúdo (areia) (C_{am}): $600,48 \text{ kg m}^{-3}$, (ii) consumo de agregado graúdo (brita) (C_b): $842,34 \text{ kg m}^{-3}$, e (iii) consumo de água (C_a): $200,16 \text{ L m}^{-3}$.

Os resultados mostraram-se coerentes com o comportamento experimental durante as betonadas, ao apresentar adequada trabalhabilidade e abatimento compatível com concretos reforçados com fibras. Então, incorporou-se as fibras de aço galvanizado e as microfibras de polipropileno em diferentes proporções volumétricas, mantido como referência o consumo total de 30 kg m^{-3} de fibras. Os traços experimentais utilizados seguiram o disposto na Tabela 9.

Tabela 9. Design dos traços experimentais para agregação das fibras.

Traço	Fibra de Aço (kg m^{-3})	Microfibra PP (kg m^{-3})
Referência	0	0
T1	29,4	0,6
T2	26	4
T3	22	8

Fonte: Autor (2026).

Observou-se o aumento progressivo da demanda por aditivo superplastificante durante as betonadas à medida em que aumentou-se o teor de microfibra, um comportamento diretamente relacionado à maior superfície específica e à redução da mobilidade interna da mistura. Dessa forma, notou-se que o ajuste experimental realizado no método ABCP foi fundamental para

garantir trabalhabilidade adequada, a dispersão uniforme das fibras e viabilidade de moldagem dos corpos de prova utilizados na pesquisa.

Reologicamente, o monitoramento das misturas indicou que o aumento gradativo do teor de microfibras de polipropileno, com ápice na dosagem de $8,0 \text{ kg m}^{-3}$, provocou uma redução severa na trabalhabilidade inicial. Atribuiu-se esse comportamento físico ao alto atrito interno gerado pelo esqueleto híbrido de arames de 50 mm e multifilamentos poliméricos, o que exigiu a introdução controlada de aditivo superplastificante para manter o adensamento eficiente dos corpos de prova sem comprometer o esqueleto estrutural e a distribuição homogênea do reforço na matriz cimentícia.

5.5. Abatimento Tronco-Cone

A caracterização do concreto no estado fresco é fundamental no controle de qualidade tecnológico da matriz cimentícia, em que a trabalhabilidade é uma das propriedades críticas. Esta propriedade está diretamente associada à capacidade da mistura em ser adequadamente lançada, adensada e moldada nas fôrmas sem que ocorram fenômenos deletérios de segregação dos agregados ou perda de homogeneidade (Mehta, 2014).

No âmbito deste trabalho, a avaliação da consistência reológica adquiriu complexidade adicional devido à introdução de um sistema híbrido de reforço, composto por macrofibras de aço (arame galvanizado) e microfibras de polipropileno (PP), materiais que conhecidamente ampliam a superfície específica interna da mistura e impõem restrições à mobilidade cinemática da pasta cimentícia (Figueiredo, 2011). Para quantificar esse comportamento de forma prática e padronizada, realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone de acordo com os preceitos da norma ABNT NBR 16889:2020 (Figura 13).

Figura 13. Registros fotográficos do teste de abatimento de cone





Fonte: Autor (2026).

Os resultados obtidos para o traço de referência e para os teores crescentes de substituição por microfibras encontram-se sintetizados na Tabela 10.

Tabela 10. Quantificação do comportamento do traço sob diferentes teores de fibras.

Configuração do Traço Experimental	Consumo de Fibras Metálicas (kg m^{-3})	Consumo de Microfibras PP (kg m^{-3})	Volume de Aditivo Superplastificante (mL)	Abatimento do Tronco de Cone (cm)
Referência	0,0	0,0	—	9,0
Substituição Leve	29,4	0,6	180	9,5
Substituição Média	26,0	4,0	200	9,0
Substituição Alta	22,0	8,0	400	10,0

Fonte: Autor (2026).

A análise comparativa revelou que no traço de referência (concreto convencional isento de reforço fibroso), a mistura apresentou comportamento plástico satisfatório com abatimento fixado em aproximadamente 9,0 cm. É importante ressaltar que a primeira tentativa de produção deste traço-base evidenciou uma fluidez excessiva provocada por uma superdosagem inicial de aditivo químico, o que comprometeu a estabilidade da matriz e exigiu o descarte do material. Posteriormente, após o reajuste das frações de massa, o concreto de referência foi refeito com sucesso e estabeleceu-se o parâmetro de consistência padrão para a calibração das dosagens subsequentes.

Com a inserção do primeiro teor de substituição híbrida, correspondente a $29,4 \text{ kg m}^{-3}$ de arame galvanizado e $0,6 \text{ kg m}^{-3}$ de microfibra de polipropileno, o abatimento manteve-se estável na faixa de 8,0 a 10,0 cm. Para essa dosagem leve, a introdução de 180 mL de aditivo superplastificante foi suficiente para garantir distribuição homogênea dos filamentos e reologia favorável, em que teores residuais de polímeros sintéticos causam uma interferência desprezível

na viscosidade da pasta coloidal e assemelham-se ao comportamento de concretos reforçados unicamente com fibras metálicas.

Ao elevar o teor de polipropileno para a condição de substituição média ($4,0 \text{ kg m}^{-3}$), observou-se uma redução moderada na mobilidade intrínseca da massa fresca. Contudo, com o incremento compensatório no volume de aditivo para 200 mL, a mistura preservou a coesão interna e sustentou um abatimento de 9,0 cm, e mostrou-se adequada para os procedimentos de moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.

O cenário reológico mais crítico manifestou-se no traço com maior teor de microfibras, no qual a concentração de polipropileno atingiu $8,0 \text{ kg m}^{-3}$ associada a $22,0 \text{ kg m}^{-3}$ de arames. Nesta etapa, a ampla área superficial gerada pela rede de microfibras provocou perda expressiva de trabalhabilidade imediata e exigiu o aumento da dosagem de aditivo superplastificante para 400 mL para forçar a dispersão do sistema.

No que tange os aspectos visuais e operacionais, a mistura manifestou o fenômeno técnico de "embolamento de fibras" (*fiber balling*), em que aglomerados elevaram consideravelmente o esforço mecânico necessário para garantir a homogeneização completa e adensamento correto do compósito.

Embora a ação combinada do aditivo superplastificante tenha viabilizado a manutenção do *slump* normativo uniforme entre 8,0 e 10,0 cm para todas as famílias de concreto testadas, o incremento progressivo de microfibras poliméricas atuou diretamente no aumento da coesão interna e na viscosidade da matriz, o que impôs limites práticos à dosagem.

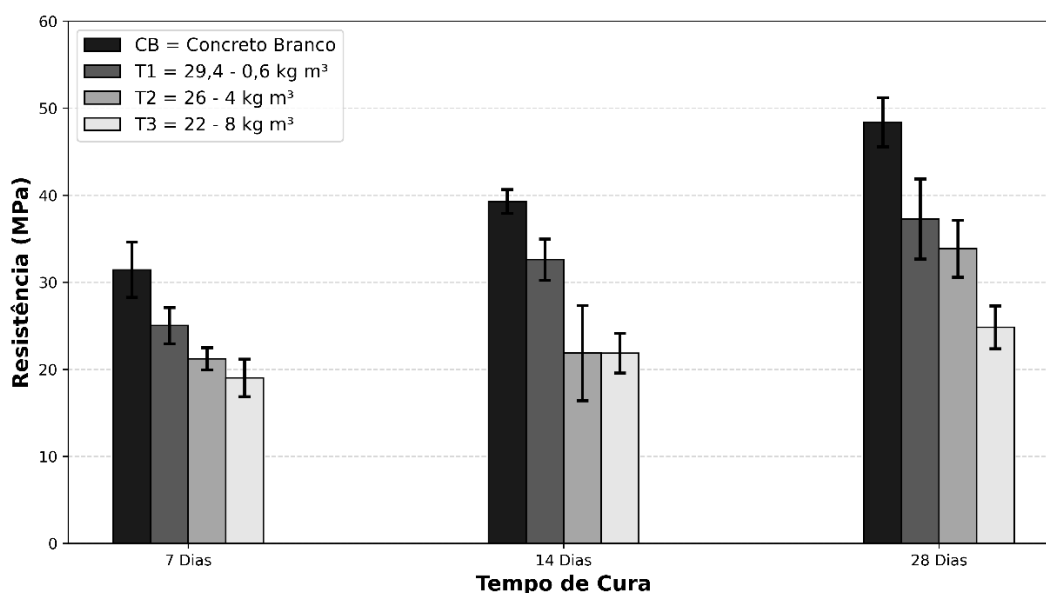
5.6. Resistência a Compressão e Tração

A avaliação do desempenho mecânico das matrizes desenvolvidas é a etapa fundamental para a validação do programa de dosagem e para a compreensão dos efeitos da hibridização do reforço fibroso no comportamento estrutural do compósito cimentício (Hasan, 2022). O ensaio de resistência à compressão axial foi executado em corpos de prova cilíndricos de dimensões nominais de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, instrumentados e submetidos a carregamento monotônico progressivo até a ruptura, conforme as diretrizes prescritas pela ABNT NBR 5739:2018. Para a conversão das cargas de ruptura obtidas na prensa hidráulica (F) em tensões de compressão (f_c), aplicou-se a relação matemática clássica baseada na área da seção transversal do cilindro (Eq. 7), com diâmetro padrão (D) de 0,10 m:

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

Para fins de padronização metodológica e calibração com os dados históricos de campo, as leituras expressas pelo manômetro do equipamento em toneladas-força (tf) foram convertidas para o Sistema Internacional de Unidades ao considerar $1\text{ tf} = 9,80665\text{ kN}$, que resultou em um fator de conversão direto para a geometria adotada (cada 1 tf de carga aplicada correspondeu a uma tensão limite de 1,2490 MPa). Realizou-se o monitoramento de forma sistemática para as idades cronológicas de controle aos 7, 14 e 28 dias de cura. A média dos resultados obtidos para cada família experimental, expressos pela evolução cinemática do ganho de resistência e acompanhados do desvio-padrão da medida, encontram-se ilustrados nas Figura 14.

Gráfico 1. Resistência a compressão e tração (prismas)



Fonte: Autor (2026)

A análise comparativa do comportamento dos compósitos revela que o Grupo 1 (Concreto Branco), formulado como matriz de controle sem a introdução de elementos de reforço, exibiu o maior desempenho mecânico absoluto em todas as idades, com resistência média de 48,40 MPa aos 28 dias. Este valor superou consideravelmente a resistência característica de projeto mínima especificada no estudo da dosagem pelo método ABCP ($f_{ck} = 25\text{ MPa}$), que consolida a eficiência do empacotamento granular da matriz de referência (Tabela 11).

Tabela 11. Comparação das resistências médias de compressão aos 7, 14 e 28 dias de cura.

Classificação das Amostras	Composição do Sistema de Reforço (kg m^{-3})	7 Dias (MPa)	14 Dias (MPa)	28 Dias (MPa)
Grupo 1 (CB)	Isento de Fibras	31,44	39,29	48,40
Grupo 2 (T1)	29,4 (Arame) + 0,6 (PP)	25,03	32,60	37,29
Grupo 3 (T2)	26,0 (Arame) + 4,0 (PP)	21,22	21,87	33,87
Grupo 4 (T3)	22,0 (Arame) + 8,0 (PP)	19,02	21,86	24,83
Grupo Adicional (GA)	30,0 (Arame Puro)	19,75	24,30	32,41

Fonte: Autor (2026).

Sob o aspecto operacional de laboratório, é relevante apontar que, durante a moldagem inicial desta série de controle, a dosagem do aditivo superplastificante foi fixada em 180 mL já na primeira betonada. Essa quantificação foi responsável por conferir a reologia necessária à mistura fresca, que manifestou comportamento plástico ideal e abatimento de exatamente 9,0 cm no *slump test*. Essa fluidez controlada e isenta de fenômenos de segregação ou exsudação garantiu o adensamento homogêneo do material e a moldagem adequada das testemunhas cilíndricas, que refletiu diretamente na evolução uniforme do ganho de resistência mecânica observado nas idades cronológicas subsequentes.

Em contrapartida, a introdução das fibras metálicas e sintéticas promoveu uma alteração significativa no comportamento mecânico sob compressão pura. Para GA, constituído por 30,0 kg m⁻³ de arame galvanizado liso e isento de microfibras de polipropileno, obteve-se resistência média de 32,41 MPa aos 28 dias. Ao analisar o comportamento individualizado das amostras desta série na idade limite (com cargas de ruptura variando de 21,46 tf a 30,19 tf, que gerou tensões entre 26,82 MPa e 37,73 MPa), constatou-se uma queda de desempenho em torno de 33% comparado ao concreto convencional isento de fibras.

Esse decréscimo é explicado pela natureza geométrica dos arames recozidos lisos. Isto é, por possuírem extremidades retas e ausência de ancoragem mecânica ativa (como ganchos ou corrugações), esses filamentos atuam primordialmente como macrodescontinuidades internas na fase fresca, que elevam o índice de vazios e gerando zonas de concentração de tensões na matriz de transição interfacial sob carregamentos de compressão axial (Naaman, 2013).

O aspecto mais inovador do estudo está na análise reológica e mecânica decorrente da substituição gradual da fração metálica por microfibras de polipropileno. Em T1, ocorreu um comportamento mecânico superior ao do grupo com arame puro, que evolui de 25,02 MPa aos 7 dias para 37,27 MPa aos 28 dias. Essa resposta mais favorável indicou que teores residuais de microfibras atuam de forma benéfica no esqueleto interno da matriz, que preencheu vazios microscópicos e interceptou microfissuras de retração logo nas primeiras idades, sem penalizar a trabalhabilidade, que permaneceu satisfatória.

No entanto, o incremento nas frações volumétricas de polipropileno para teores médios e altos evidenciou os limites tecnológicos da hibridização sem adensamento especial. O Grupo 3 (T2) estabilizou a resistência em 33,85 MPa aos 28 dias e manifestou sutil estagnação entre os 7 e 14 dias (21,21 MPa e 21,86 MPa), que coincidiu com o início da perda de trabalhabilidade

e maior demanda de aditivo superplastificante no estado fresco para mantimento do valor do *slump* em 9,0 cm.

Esse fenômeno de degradação mecânica culminou de forma severa no Grupo 4, cuja resistência aos 28 dias limitou-se a apenas 24,82 MPa, valor inferior inclusive à própria meta de projeto estrutural. As observações em laboratório justificam esse decréscimo: a altíssima concentração superficial de filamentos poliméricos sintéticos alterou drasticamente a reologia da mistura e fez com que o concreto perdesse a plasticidade natural, operacionalmente descrito como "mistura em pano" (Autor, 2026).

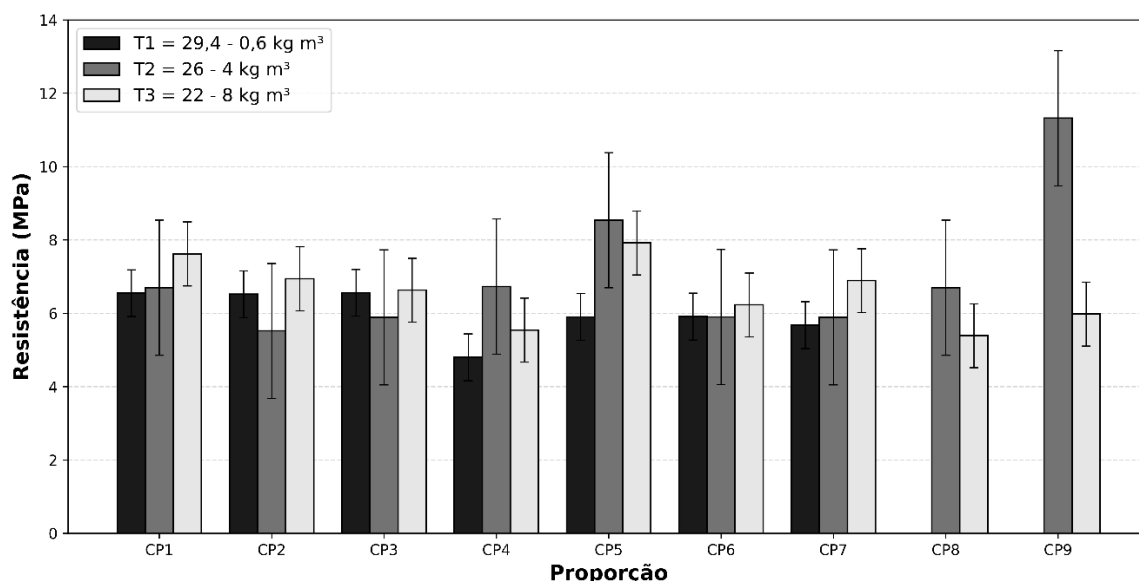
A alta coesão interna induziu o embolamento severo das fibras (*fiber balling*), que exigiu a adição forçada de volumes elevados de aditivo (400 mL) e água extra para assim viabilizar a homogeneização básica. O aprisionamento resultante de bolhas de ar e a formação de ninhos de agregados mal adensados geraram uma estrutura interna altamente porosa. Isso demonstrou que, embora a hibridização seja eficiente para o controle de fissuração, teores de microfibras de polipropileno da ordem de $8,0 \text{ kg m}^{-3}$ tornam-se contraproducentes para matrizes de concreto convencional submetidas a esforços de compressão axial.

5.7. Resistência a Tração na Flexão

A análise do comportamento mecânico do concreto submetido a esforços de tração na flexão tem importância crítica na validação de matrizes cimentícias reforçadas com fibras discretas. Diferente do ensaio de compressão pura, em que a presença das fibras muitas vezes atua de forma secundária ou marginal na tensão de pico, a solicitação de flexão tende a expor diretamente a capacidade do reforço fibroso em atuar como ponte de transferência de tensões (*bridging effect*) através das faces das micro e microfissuras (Weidmann, 2008).

Para este programa experimental, moldou-se corpos de prova prismáticos submetidos ao ensaio de carregamento em dois pontos (flexão a quatro pontos), com idade de controle fixada aos 28 dias, como prescrito pela norma ABNT NBR 12142:2010. Sob o aspecto de validação metodológica, todas as amostras rompidas nas três famílias híbridas manifestaram planos de fratura localizados estritamente dentro do terço central do vão livre. Esse comportamento atende às exigências de controle da ABNT NBR 12142:2010 e indica que as tensões cisalhantes foram minimizadas e que a ruptura ocorreu puramente por tração direta na fibra inferior mais solicitada do prisma (Figura 15).

Gráfico 2. Resistência a tração na flexão nos prismas aos 28 dias de cura



Fonte: Autor (2026). **Nota:** Valores de T1 para CP8 e CP9 não foram mensurados.

A análise dos dados experimentais revela que o Grupo 2 (T1) (menor teor de microfibras de polipropileno - 0,6 kg m⁻³ associado a 29,4 kg m⁻³ de arame galvanizado liso), alcançou o pior desempenho mecânico entre todas as misturas investigadas e, por vez, registrou resistência média à flexão de 5,99 Mpa, porém um ótimo controle de dispersão (10,66%).

Do ponto de vista da física dos materiais, o desempenho observado para o traço com 0,6 kg/m³ de microfibra de polipropileno indica que esse teor de incorporação pode não ter sido suficiente para promover ganhos significativos na resistência à tração na flexão. Embora as microfibras atuem na contenção e na costura de microfissuras intrínsecas da matriz cimentícia, sua baixa concentração pode ter limitado a formação de uma rede de reforço capaz de contribuir efetivamente para o mecanismo de transferência de tensões.

Além disso, apesar de os arames galvanizados de 50 mm desempenharem a função de restringir a propagação de macrofissuras após a fissuração da matriz, a interação entre os diferentes mecanismos de reforço não se mostrou suficiente para proporcionar desempenho superior aos demais traços analisados. Dessa forma, os resultados sugerem que a eficiência do reforço fibroso está diretamente relacionada ao teor de fibras incorporado, sendo necessária uma quantidade adequada para que os mecanismos de ponteamto de fissuras (bridging effect) e resistência ao arrancamento (pull-out) atuem de forma mais efetiva. (Tabela 12).

Tabela 12. Comparação das resistências médias a flexão aos 28 dias de cura.

Classificação das Amostras	Teor de Arame (kg m^{-3})	Teor de Polipropileno (kg m^{-3})	Resistência Média à Flexão (MPa)
Grupo Adicional	30,0	0	7,92
Grupo 2 (T1)	29,4	0,6	5,99
Grupo 3 (T2)	26,0	4,0	6,48
Grupo 4 (T3)	22,0	8,0	6,57

Fonte: Autor (2026).

Por outro lado, o incremento gradativo nas frações volumétricas do polímero sintético resultou em acréscimos progressivos na capacidade de carga sob flexão. O Grupo 3, com substituição média de $4,0 \text{ kg m}^{-3}$ de polipropileno, apresentou uma resistência média à flexão de 6,68 MPa. Embora o incremento observado tenha sido moderado, os resultados demonstram que o aumento do teor de microfibra para 4 kg/m^3 proporcionou melhoria no desempenho mecânico do concreto em relação ao traço com menor teor de fibras.

É oportuno destacar que a análise estatística inicial desta série identificou a ocorrência de um valor atípico (*outlier*) excessivamente elevado (11,32 MPa), nitidamente gerado por um erro de leitura do manômetro ou concentração localizada anômala de arames no plano de ruptura. Portanto, esse valor discrepante foi removido para evitar a influência no valor da média real da família.

O comportamento observado no Grupo 4 evidenciou uma resistência média de 6,57 MPa, valor ligeiramente superior ao obtido no Grupo 2 (6,48 MPa), correspondendo a um incremento aproximado de 1,4%. Embora esse resultado demonstre um ganho de desempenho mecânico, a magnitude desse aumento foi relativamente pequena quando comparada ao acréscimo significativo do teor de microfibras incorporado ao concreto.

Esse comportamento pode estar associado às alterações reológicas observadas durante o ensaio de abatimento (*slump test*). Conforme verificado experimentalmente, a elevada concentração de microfibras de polipropileno reduziu significativamente a trabalhabilidade da mistura, dificultando a homogeneização do concreto e favorecendo a ocorrência de aglomerados de fibras (*fiber balling*). Dessa forma, embora o aumento do teor de fibras tenha contribuído para uma discreta elevação da resistência, os problemas de dispersão e de moldagem podem ter limitado o potencial de reforço esperado para essa dosagem.

Portanto, os resultados obtidos indicam que o aumento do teor de microfibras de polipropileno contribuiu para o incremento da resistência à tração na flexão do concreto. Entretanto, observou-se que os ganhos se tornaram progressivamente menores à medida que a quantidade de fibras incorporadas foi elevada, sugerindo a existência de um limite de eficiência para esse tipo de reforço.

Embora o teor de $8,0 \text{ kg/m}^3$ tenha apresentado o melhor desempenho entre os traços analisados, o acréscimo de resistência em relação ao teor intermediário foi pouco significativo, indicando uma tendência de estabilização dos ganhos mecânicos. Esse comportamento pode estar relacionado às dificuldades de dispersão das fibras e à redução da trabalhabilidade da mistura, fatores que tendem a se intensificar com o aumento da concentração de microfibras.

Dessa forma, os resultados sugerem que teores superiores aos investigados nesta pesquisa podem não resultar em aumentos proporcionais de resistência, sendo recomendados estudos complementares para determinar o ponto de saturação do material e avaliar os efeitos da incorporação de quantidades ainda maiores de microfibras de polipropileno.

6. CONCLUSÃO

O estudo experimental avaliou de forma sistemática os efeitos reológicos e mecânicos decorrentes da incorporação e hibridização de macrofibras de aço (arame galvanizado) e microfibras de polipropileno (PP) em matrizes de concreto convencional, utilizando insumos e agregados da região de Imperatriz – MA. Assim, consolida-se as seguintes conclusões:

- O método de dosagem teórica da ABCP mostrou-se uma ferramenta inicial eficiente, porém exigiu ajustes empíricos laboratoriais no teor de argamassa e mitigar o fenômeno de *fiber balling*. Para isso, travar a relação a/c em 0,48 garantiu a manutenção da integridade da matriz cimentícia;
- A incorporação de teores crescentes de microfibras PP reduziu a fluidez natural do concreto fresco, que demandou incrementos controlados no consumo de aditivo superplastificante. A ação química do aditivo garantiu a manutenção de *slumps* regulamentares entre 8,0 cm e 10,0 cm para viabilizar o adensamento correto das peças estruturais;
- O concreto de referência (concreto branco) exibiu elevada eficiência mecânica aos 28 dias (48,37 MPa). A introdução das fibras de aço galvanizado e as microfibras resultaram em uma redução significativa da resistência à compressão. Esse comportamento é atribuído ao efeito das próprias fibras na matriz cimentícia, que podem gerar descontinuidades internas, aumentar a porosidade e dificultar a compactação homogênea do concreto. Apesar disso, a presença das fibras contribui para ganhos em ductilidade e desempenho pós-fissuração. A hibridização combinada com baixos teores de polipropileno demonstrou capacidade de estabilizar parcialmente essa perda de desempenho.
- Os ensaios de flexão prismática confirmaram a eficácia do mecanismo de ponte de transferência de tensões (*bridging effect*) exercido pelas fibras. O teor de hibridização contendo 0,6 kg/m³ de microfibras de polipropileno associado ao reforço metálico consolidou-se como o arranjo de melhor sinergia técnica para o controle de microfissuras por retração sem penalizar as propriedades globais do compósito.

A hibridização proposta valida-se como uma alternativa técnica viável para a produção de elementos de concreto de maior ductilidade, desde que respeitados os critérios de controle tecnológico dos insumos e os ajustes finos de teor de argamassa em laboratório. Recomenda-se para trabalhos futuros a aplicação de testes estatísticos formais de exclusão de outliers e a análise microestrutural da interface pasta-fibra por microscopia eletrônica.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.4R**: guide to design with fiber reinforced concrete. Farmington Hills, 2018.
- ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. **Desenvolvimento das técnicas de produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural na escala 1:4**. 2002. 121 f. Dissertação (Mestre em engenharia civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.
- ARIF, Mohammed Adel. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. 2014. 156 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697:2018**: Cimento Portland — Requisitos. 1. ed. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9775**: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para o concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ABDUCHE, J. R.; AUGUSTO, J. C. **Tecnologia do Concreto**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C496/C496M-17**: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C544-18**: Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete. West Conshohocken, PA, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem de concreto**. São Paulo: ABCP, 2002.

ALMEIDA, J. C. C. **Estudo da influência das fibras de polipropileno no concreto**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de [Estado], 2012.

ANDOLFATO, R. P. **Concreto reforçado com fibras: propriedades e aplicações**. São Paulo: Pini, 2002. (Corrigido de "ANDOLFATO").

ASSUNÇÃO, R. B. **Dosagem de concretos especiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2002.

BARROS, L. A. S. **Concreto de alto desempenho: dosagem e propriedades**. São Paulo: Pini, 2009.

BITENCOURT JR., L. A. et al. **Fiber-reinforced concrete: a review of experimental results**. Journal of Building Engineering, v. 25, 2019.

CHEUNG, M.; ROBERTS, M.; LIU, H. **Mechanical behavior of fiber-reinforced cementitious composites**. Construction and Building Materials, v. 182, p. 120-135, 2018.

FAROKHZAD, M. et al. Experimental study on the mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, 2016.

FERRAZ, E. **Fibras em concretos e argamassas**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2016.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. São Paulo: Pini, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

FUSCO, P. B.; ONISHI, R. M. **Estruturas de concreto reforçado com fibras**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2018.

GALENO, A. et al. **Study on the durability of fiber-reinforced concrete in aggressive environments**. Materials, v. 13, n. 15, 2020.

GIDRÃO, G. et al. **Impact of fibers on the structural performance of concrete slabs**. Engineering Structures, v. 235, 2021.

GONÇALVES, J. P.; LIMA, R. C.; RODRIGUES, M. **Mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, 2019.

HASAN, M.; RABINO, F.; MARUF BILLAH, A. H. M. **A review on the performance of hybrid fiber reinforced concrete**. Journal of Materials Research and Technology, v. 17, 2022.

KURUVILLA, J. et al. **Advances in fiber-reinforced concrete composites**. Construction and Building Materials, v. 280, 2021.

LIEW, M. S. et al. **Fiber-reinforced concrete: applications and challenges**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MUNIZ, A. L. **Estudo experimental de concretos reforçados com fibras metálicas e poliméricas**. 2021. Dissertação (Mestrado) – [Instituição], 2021.

NAAMAN, A. E. **Fiber Reinforced Cement Composites**. 2. ed. Ann Arbor: Techno Press, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, T.; NATALÍNA, S. **Desenvolvimento de novos compósitos cimentícios**. São Paulo: Edusp, 2020.

QIANG, Y. et al. **Synergistic effect of hybrid fibers on concrete properties**. Construction and Building Materials, v. 270, 2021.

QUISSANGA, F.; PIMENTEL, M. **Avaliação do desempenho de fibras em matrizes cimentícias**. Revista Brasileira de Engenharia, 2019.

RÊGO, J. et al. **Hybridization of fibers in concrete: a critical review**. Journal of Building Engineering, v. 45, 2022.

SANDOVAL, Gerson Fernando Barreto. **Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis**. 2014. 122 f. Dissertação (Mestre em edificações e saneamento) – Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014

UMA, B.; SUGANYA, M.; SARANYA, A. **Experimental investigation on**

SOUSA, L. **Análise comparativa das propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de arame galvanizado e com fibras de aço**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL), Imperatriz, 2025.

WEIDMANN, C. **Fibras para reforço de concreto**. 1. ed. Curitiba: UFPR, 2008.

ZHAO, J. et al. Study on ITZ and fiber-matrix bond strength in hybrid fiber reinforced concrete.



Construction and Building Materials, v. 337, 2022.

KALIFA, P.; CHÉNÉ, G.; GALLÉ, C. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: from spalling to microstructure. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 10, p. 1487-1499, **2001**.