



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Câmpus Anápolis

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM
DIFERENTES TEORES DE FIBRA DE AÇO**

REGINALDO BENTO PEREIRA NETTO

ORIENTADOR: Prof. DR. DIEGO BORJA FERREIRA

PUBLICAÇÃO:

ANÁPOLIS

2026

REGINALDO BENTO PEREIRA NETTO

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM
DIFERENTES TEORES DE FIBRA DE AÇO**

Trabalho de Conclusão do Curso I de Engenharia Civil da
Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás – Campus Anápolis, como requisito
parcial para conclusão de curso.

Orientador: Prof. Dr. Diego Borja Ferreira

ANÁPOLIS, 2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N476a NETTO, Reginaldo Bento Pereira

Análise das propriedades mecânicas do concreto com diferentes teorias de fibra de aço. / Reginaldo Bento Pereira Netto. – Anápolis: IFG, 2026.
76 f. il. color.

Orientador: Prof. Dr. Diego Borja Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Anápolis – Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade, 2026.

1. Concreto com fibras. 2. Macrofibras de aço. 3. Propriedades mecânicas. 4. Trabalhabilidade. 5. Ensaio experimental.

I. FERREIRA, Diego Borja (orient.).

II. Título.

CDD 624.1834

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM DIFERENTES TEORES DE FIBRA DE AÇO**, sob orientação de Diego Borja Ferreira, apresentado pelo aluno **Reginaldo Bento Pereira Netto (20171060130053)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade (Câmpus Anápolis)**. Os trabalhos foram iniciados às **15:18** do dia **12/02/2026** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Diego Borja Ferreira** (Presidente)
- **Paulo Henrique Menezes Silva** (Examinador Interno)
- **Lucas de Oliveira Zuniga** (Examinador Externo)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 10,0

Observação / Apreciações:

O aluno demonstrou bastante interesse e desenvoltura no desenvolvimento das atividades experimentais, com desempenho excelente.

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Diego Borja Ferreira** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Diego Borja Ferreira**, em **12/02/2026 15:45:19** com chave **fa9adfd4084211f1b68e005056a537a4**.
- **Paulo Henrique Menezes Silva**, em **12/02/2026 15:57:48** com chave **b94fd79e084411f18e05005056a537a4**.
- **Lucas de Oliveira Zuniga**, em **12/02/2026 15:48:39** com chave **72081df2084311f1bd66005056a537a4**.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 13/02/2026

Código de Autenticação: 87f960





INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Reginaldo Bento Pereira Netto

Matrícula: 20171060130053

Título do Trabalho: Análise das Propriedades Mecânicas do Concreto com Diferentes Teores de Fibra de Aço

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Anápolis GO,
Local

25 / 02 / 2026.
Data

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS**



Documento assinado digitalmente

REGINALDO BENTO PEREIRA NETTO

Data: 25/02/2026 17:16:30-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Dedico a todos que fizeram e fazem parte de minha vida, em especial minha família e a meu irmão Iago Antônio Pereira dos Santos (in memoriam), que não teve a graça de compartilhar junto a nós inúmeros momentos de alegrias e vitórias. Saudades eternas!

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma investigação experimental acerca do comportamento mecânico do concreto reforçado com macrofibras de aço, avaliando sua influência em diferentes teores na matriz cimentícia. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica aprofundada sobre o concreto convencional, suas propriedades no estado fresco e endurecido, além do histórico, tipos, aplicações e mecanismos de atuação das fibras metálicas, especialmente as de aço. Foram elaborados seis traços de concreto: um de referência (sem fibras) e cinco com adições de macrofibras nos teores de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2% e 3%. A trabalhabilidade das misturas no estado fresco foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), enquanto as propriedades no estado endurecido foram analisadas por ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade, conforme as normas da ABNT. A pesquisa visa identificar as contribuições das fibras metálicas quanto à melhora da resistência mecânica e ductilidade do concreto. Os resultados obtidos permitiram comparar o desempenho dos traços com fibras em relação ao concreto convencional, auxiliando na definição de dosagens mais eficientes e no incentivo à aplicação de materiais fibrosos na engenharia civil.

Palavras-chave: Concreto com fibras. Macrofibras de aço. Propriedades mecânicas. Trabalhabilidade. Ensaio experimental.

ABSTRACT

This research presents an experimental investigation into the mechanical behavior of concrete reinforced with steel macrofibers, evaluating their influence at different contents in the cementitious matrix. Initially, an in-depth literature review was conducted on conventional concrete, its properties in the fresh and hardened state, as well as the history, types, applications, and mechanisms of action of metal fibers, especially steel fibers. Six concrete mixes were prepared: one reference mix (without fibers) and five with macrofiber additions at contents of 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2%, and 3%. The workability of the mixtures in the fresh state was evaluated using the slump test, while the properties in the hardened state were analyzed by tests of axial compressive strength, diametral compression tensile strength, flexural tensile strength, and modulus of elasticity, in accordance with ABNT standards. The research aims to identify the contributions of metal fibers to improving the mechanical strength and ductility of concrete. The results obtained allowed for a comparison of the performance of fiber-reinforced concrete with conventional concrete, helping to define more efficient dosages and encouraging the use of fibrous materials in civil engineering.

Keywords: Fiber-reinforced concrete. Steel macrofibers. Mechanical properties. Workability. Experimental testing.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Concreto Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
CAA	Concreto Auto Adensável
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAUD	Concreto de Ultra-Alto Desempenho
CEF	Fibras de Cerâmica
CF	Fibras de Carbono
CP	Cimento Portland
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
EB	Especificação Brasileira
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FCK	Resistência Característica do Concreto à Compressão
GF	Fibras de Vidro
GFRC	Concreto Reforçado com Fibras de Vidro
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares
MTF	Fibras de Metal
NBR	Norma Brasileira Registrada
RAA	Reação Álcali-Agregado

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de dosagem típico do Método IPT/EPUSP.	15
Figura 2 - Seção polida de um corpo de prova de concreto (Macroestrutura).	17
Figura 3 – Microestrutura de uma pasta de cimento hidratada.	18
Figura 4 - Procedimento Slump-Test.	21
Figura 5 - Configuração Típica Slump-Test.	21
Figura 6 - Alguns tipos de fibras no mercado.	29
Figura 7 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem e com reforço de fibras.	31
Figura 8 – CP II-F 32, utilizado.	45
Figura 9 – Aspecto visual macrofibras de aço.	47
Figura 10 – Aditivo plastificante utilizado.	48
Figura 11 - Apresenta os respectivos ensaios realizados.	52
Figura 12 – Ensaio de abatimento do concreto (T1 a T6).	54
Figura 13 – Ensaio resistência à compressão.	55
Figura 14 – Corpos de prova pós ruptura (T2 e T6).	57
Figura 15 – Resistência à tração por compressão diametral.	58
Figura 16 – Corpos de prova pós ruptura (T1, T3, T5 E T6).	60
Figura 17 – Tração na flexão.	61
Figura 18 – Corpos de prova pós ruptura (T1, T4 e T6).	63
Figura 19 – Módulo de elasticidade.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites da Distribuição Granulométrica do Agregado Miúdo.	12
Tabela 2 – Tipos de Fibras mais comuns e suas propriedades.	28
Tabela 3 – Tipo, Classe e Geometria das Fibras de Aço.	34
Tabela 4 – Níveis de resistência mínima das Fibras de Aço para cada Classe.	35
Tabela 5 – Características da areia (agregado miúdo).	44
Tabela 6 – Características da brita (agregado graúdo).	44
Tabela 7 – Propriedades e características do cimento CP II-F 32.	46
Tabela 8 – Parâmetros da macrofibra utilizada.	47
Tabela 9 – Resumo dos traços de concreto utilizados na pesquisa.	49
Tabela 10 – Resultados dos slump test e a adição do teor de aditivos para cada traço (T1 a T6).	53
Tabela 11 – Resultados do ensaio à compressão.	55
Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração por Compressão diametral.	57
Tabela 13 – Resultados do ensaio de tração na flexão.	61
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVO	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1. Concreto Convencional	9
3.1.1 Cimento	11
3.1.2 Agregados	11
3.1.3 Água e Aditivos	13
3.1.4 Dosagem	14
3.1.5 Concreto no Estado Endurecido	16
3.1.6 Propriedades do concreto no estado endurecido	18
3.1.7 Propriedades do concreto no estado fresco	20
3.1.8 Avanços Tecnológicos e Tendências	22
3.2 Concreto Reforçado com Fibras	24
3.2.1 Tipos de Fibras	26
3.2.2 Vantagens do uso de Fibras no Concreto	30
3.2.3 Mecanismo de atuação das fibras no controle de fissuras	30
3.3 Fibras de Aço	32
3.3.1 Tipos e Formatos	32
3.3.2 Propriedades Mecânicas	35
3.3.3 Influência nas propriedades do Concreto	36
3.4 Trabalhabilidade, Resistência e Durabilidade	37
3.4.1 Efeitos das Fibras em testes padrão (Slump, Compressão, Tração e Flexão)	38
3.4.2 Estudo de casos anteriores	39
3.5 Aplicação de Concreto com Fibras na Construção Civil	40
4 METODOLOGIA	41
5 MATERIAIS E MÉTODOS	42
5.1 Caracterização dos Materiais	42
5.1.1 Ensaios de caracterização da areia	43
5.1.2 Ensaios de caracterização da brita	44
5.1.3 Caracterização do cimento	45
5.1.4 Caracterização das fibras de aço	46
5.1.5 Caracterização do aditivo	48
5.2 Definição dos traços de concreto com e sem fibras	48
5.3 Procedimento de produção do concreto	49
5.4 Ensaios laboratoriais realizados	50
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
6.1 Confronto com a Literatura	65

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
7.1 Conclusões gerais	68
7.2 Desempenho do concreto com fibras estudado	68
7.3 Limitações do estudo	69
7.4 Sugestões para trabalhos futuros	70
REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os avanços tecnológicos têm se expandido rapidamente em diversas áreas do conhecimento, incluindo a construção civil que segue a passos largos com o intuito a se obter evolução aos sistemas construtivos, aprimorando a forma de manusear os materiais utilizados desenvolvendo soluções inovadoras as quais se elevem as propriedades dos mesmos, garantindo maior eficiência, resistência, trabalhabilidade e economia em sua execução. Sendo o de maior exemplo o concreto.

O concreto simples é um material de construção cuja utilização remonta à Antiguidade, com registros iniciais atribuídos a Romanos e Gregos, que misturavam agregados minerais (como areia e rocha) ao calcário calcinado e à água (NEVILLE, 2016). Trata-se de um compósito que exige, essencialmente, a formação de uma pasta de cimento, obtida pela combinação de cimento e água, juntamente com agregados miúdos e graúdos. Sua composição pode ainda ser modificada com a inclusão de aditivos e adições minerais, visando aprimorar suas propriedades no estado fresco e endurecido (MOSCATELLI, 2011).

O concreto convencional, composto por aglomerante, é atualmente o material mais empregado na construção civil. Segundo FIGUEIREDO (2011a), tal preferência se deve ao seu baixo custo e à capacidade de adaptação a diferentes condições de produção. No entanto, esse tipo de concreto ainda apresenta limitações, como a dificuldade de preenchimento completo de peças esbeltas e fortemente armadas, baixa ductilidade, retração plástica e elevada permeabilidade em ambientes úmidos, fatores que contribuem para o surgimento de diversas patologias. A busca pela mitigação ou eliminação dessas deficiências impulsionou pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de novas tecnologias, resultando no aparecimento, ao longo dos anos, dos chamados concreto especiais, os quais proporcionam avanços significativos em comparação ao concreto convencional.

Os concretos especiais são definidos como materiais com propriedades específicas, desenvolvidas a partir do aprimoramento tecnológico, o qual permitiu superar deficiências do concreto convencional ou incorporar características não usuais a esse material. Essa evolução possibilitou a adequação às particularidades de cada tipo de obra, bem como a aplicação em condições e ambientes nos quais o concreto tradicional apresenta limitações (FIGUEIREDO et al., 2004). Com base nesses avanços, diversos tipos de concretos leves, de alto desempenho,

auto adensáveis, de massa, pesados, rolados, com retração compensada, reforçados com fibras, com adição de polímeros, entre outros.

A resistência do concreto é considerada uma propriedade variável, uma vez que depende de múltiplos fatores, tais como a dosagem e homogeneidade dos materiais, a qualidade e o modo de lançamento, o adensamento e as condições de cura, além das condições de transporte e armazenamento dos insumos. Dessa forma, o concreto apresenta variabilidade tanto espacial quanto temporal, sendo um material no qual resistência evolui com o tempo (FUSCO, 2008).

De acordo com GÓIS (2010), uma das principais limitações do concreto convencional reside em sua baixa resistência à tração, a qual corresponde a apenas 7% a 10% da sua resistência à compressão. Nesse contexto, o concreto reforçado com fibras (CRF) surge como uma solução eficaz para melhorar o desempenho da resistência à tração. Além disso, conforme destacam MEHTA E MONTEIRO (2014), a resistência ao impacto, também considerada uma deficiência do concreto convencional, tem sido significativamente aprimorada por meio da incorporação de micro armaduras de reforço, com fibras.

Segundo o CARNIO, M. A. (2017), o uso de fibras no concreto teve início por volta da década de 1960. Inicialmente, sua aplicação visava o aumento de resistência mecânica; no entanto, constatou-se posteriormente que sua principal contribuição estava em conferir maior rigidez ao concreto. As fibras de aço são especialmente recomendadas para estruturas em que os esforços de tração ocorrem em posições fixas e bem definidas, como em pavimentos e tubos de concreto.

O teor de fibras é uma variável significativa no desempenho do compósito, influenciando diretamente a resistência à pós-fissuração. Especificamente para fibras de aço, teores inferiores a 0,5% promovem apenas incremento na tenacidade, sem resultar em ganhos efetivos da resistência mecânica (RODRIGUES, 2010).

Dentre os diversos tipos de fibras, as de aço destacam-se por serem amplamente empregadas em aplicações estruturais, além de também serem consideradas em usos não estruturais (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Essas fibras apresentam formatos variados, visando otimizar a aderência com a matriz cimentante. Em função de seu potencial de aprimorar as propriedades mecânicas dos materiais de construção, têm sido objetivo de um número crescente de estudos e pesquisas.

A pesquisa é de fundamental importância para a engenharia civil e a construção civil, pois contribui para o aprimoramento do desempenho mecânico do concreto por meio de

incorporação de fibras de aço. A investigação de diferentes teores e comportamentos dessas fibras permite otimizar propriedades como resistência à tração, tenacidade e durabilidade, resultando em estruturas mais seguras, eficientes e economicamente viáveis, alinhadas às exigências atuais de desempenho e sustentabilidade no setor.

2. OBJETIVO

Diante do exposto, este trabalho adota uma abordagem experimental com o objetivo de avaliar a influência da adição de fibras de aço ao concreto, quanto às suas propriedades mecânicas. Assim como o concreto simples, o concreto reforçado com fibras constitui uma tecnologia em constante estudo, especialmente quanto às diferenças de desempenho em relação ao concreto convencional. Trata-se de uma solução relativamente recente que apresenta potencial para melhoria do comportamento pós-fissuração. Nesse contexto, o presente estudo torna-se relevante ao investigar quais percentuais de fibras de aço são mais adequados para incorporação à matriz do concreto, com vista à obtenção de melhores resultados em termos de resistência mecânica das estruturas.

Geral:

- Avaliar o comportamento mecânico do concreto com diferentes teores de fibras de aço.

Específicos:

- Analisar a resistência à compressão, tração (na flexão, compressão diametral) e módulo de elasticidade.
- Observar a trabalhabilidade do concreto com fibras.
- Comparar os resultados com o concreto convencional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Concreto Convencional

As origens do concreto, em sua forma mais rudimentar, remontam às civilizações egípcia e romana. Atualmente, trata-se do segundo material mais consumido globalmente, superado apenas pela água. A evolução do concreto está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento do cimento, que atua como aglomerante promovendo a coesão entre os agregados, geralmente areia e brita (GRAZIANO, 2005).

Na engenharia moderna, o concreto é uma rocha artificial resultante da mistura homogênea e proporcional de cimento Portland, agregados graúdos e miúdos, água e, em muitos casos, aditivos e adições minerais. Essa composição, ao passar pelo processo de hidratação do cimento, dá origem a uma matriz sólida de elevada rigidez e resistência. Essa característica, aliada à sua boa trabalhabilidade no estado fresco, permite que o concreto se adapte a diversas geometrias e formas estruturais, sendo viável para uso em fundações, pilares, vigas, lajes, pavimentos, reservatórios e elementos arquitetônicos (NEVILLE, 1995).

Além de suas qualidades técnicas, o concreto também se destaca por seu custo relativamente baixo, em comparação a outros materiais estruturais como o aço ou a madeira industrializada. A acessibilidade dos seus insumos, especialmente em países em desenvolvimento, contribui para sua hegemonia na indústria da construção civil (HELENE, 1992).

No entanto, essa predominância também impõe desafios significativos, como a necessidade de garantir durabilidade frente aos agentes agressivos, otimizar seu desempenho mecânico, reduzir impactos ambientais e atender às exigências de desempenho previstas em norma (ISAIA, 2010a).

O concreto é um material de características plásticas notáveis, amplamente reconhecido por sua capacidade de se moldar a diversas formas com facilidade. Apresenta elevada resistência à compressão, bom desempenho frente a altas temperaturas e elevada durabilidade, podendo exercer a função de material estrutural por longos períodos, desde que aplicado corretamente. Contudo, sua resistência à tração é significativamente inferior a aproximadamente um décimo da resistência à compressão, configurando-se como sua principal limitação mecânica (GRAZIANO, 2005).

Segundo (CARVALHO, 2017) o concreto é um compósito formado basicamente por cimento, água e agregados. A depender da granulometria dos agregados utilizados e da proporção entre os materiais, obtêm-se diferentes composições:

- Pasta: mistura de cimento mais água;
- Argamassa: pasta acrescido de agregado miúdo;
- Concreto: argamassa acrescido de agregado graúdo;

Esse tipo de concreto é caracterizado pela moldagem no local da obra, cura convencional e pelo uso de traços não sofisticados, com resistência característica à compressão variando entre 20 MPa e 40 MPa (HELENE, 1992; ISAIA, 2010a).

A origem do termo “convencional” se dá em contraste com outras categorias de concretos mais recentes e tecnologicamente avançados, como o concreto de alto desempenho (CAD), concreto autoadensável (CAA), concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) e concretos sustentáveis com adições recicladas. O concreto convencional, por outro lado, segue métodos tradicionais de produção, lançamento e cura, sendo amplamente utilizado em obras de pequeno e médio porte, obras públicas e estruturas não sujeitas a solicitações extremamente severas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O princípio básico de funcionamento do concreto reside na hidratação do cimento Portland, cujos compostos, principalmente o silicato tricálcico (C_3S) e o silicato dicálcico (C_2S), reagem com a água para formar produtos hidratados, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). O C-S-H é responsável pela resistência mecânica e pela ligação entre os grãos dos agregados, consolidando a matriz sólida do concreto (NEVILLE, 1995). Esse processo de hidratação é exotérmico e contínuo, sendo afetado pelas condições ambientais, relação água/cimento (a/c), finura do cimento e adições empregadas.

Do ponto de vista estrutural, o concreto convencional apresenta comportamento resistente à compressão, mas baixa resistência à tração e flexão, o que limita sua aplicação isolada em elementos sujeitos a solicitações à esforços de tração. Por essa razão, é frequentemente utilizado em conjunto com armaduras de aço, formando o concreto armado, solução que combina as vantagens mecânicas dos dois materiais e permite a absorção simultânea de esforços a compressão e tração (ISAIA, 2010a; ABNT NBR 6118, 2014).

A atuação do concreto convencional no desempenho das estruturas depende diretamente de seu processo de produção, incluindo a escolha e proporção dos materiais, mistura,

lançamento, adensamento e cura. Uma execução deficiente pode comprometer não apenas a resistência do concreto, mas também sua durabilidade e integridade estrutural ao longo do tempo. Por isso, o concreto convencional requer controle rigoroso de qualidade, mesmo sendo uma tecnologia considerada tradicional (HELENE, 1992).

3.1.1 Cimento

Os cimentos utilizados na execução de estruturas em concreto apresentam distintas classes de qualidade, adequando-se às exigências de desempenho das obras. As diversas tipologias de cimento disponíveis no mercado são produzidas com o intuito de atender a demandas usuais ou específicas de aplicação, podendo também resultar do aproveitamento de subprodutos oriundos de outros processos industriais, como é o caso da escória de alto-forno (FUSCO, 2012).

Independentemente do tipo, os cimentos possuem composição básica semelhante, diferenciando-se principalmente pelas proporções relativas de seus constituintes. Os principais constituintes do cimento são o óxido de cálcio (CaO), o dióxido de silício (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3). Esses componentes são aglutinados por meio do processo de sinterização, que consiste na aplicação de calor à mistura até que ocorra uma fusão incipiente. Em seguida, o material resultante é submetido à moagem até atingir uma granulometria adequada (FUSCO, 2012).

Segundo o mesmo autor, as normas brasileiras indicam a aplicação de alguns cimentos na construção das estruturas de concreto. Entre eles o mais utilizado são os cimentos de endurecimento normal (cimento Portland comum): Cimento Portland CP-25, CP-32, CP-40 (ABNT NBR 5732, 1991).

O cimento Portland moderno foi patenteado em 1824 por James Parker e Joseph Aspdin, marcando um divisor de águas na engenharia de materiais (FUSCO, 2012).

Para (CARVALHO, 2017) devido ao elevado custo do cimento, busca-se otimizar a granulometria dos agregados, utilizando-se materiais de maiores dimensões, o que permite redução de custos sem comprometer significativamente a qualidade do concreto.

3.1.2 Agregados

Segundo BAUER (2016), agregado é um material particulado de natureza incoesiva e com atividade química praticamente desprezível, composto por uma mistura de partículas que

abrange uma ampla faixa granulométrica. Na tecnologia do concreto, o termo 'agregado' é amplamente utilizado, embora em outros segmentos da construção civil os mesmos materiais sejam denominados conforme sua tipologia específica, como: fíler, brita, bica-corrida, rachão, entre outros.

Os agregados utilizados na composição do concreto são classificados em miúdos e graúdos, conforme sua distribuição granulométrica. De acordo com a Especificação Brasileira EB-4, considera-se agregado miúdo aquele constituído por areia natural de origem quartzosa ou por areia artificial, obtida a partir do britamento de rochas estáveis, com diâmetro máximo característico inferior ou igual a 4,8 mm (FUSCO, 2012).

Por sua vez, o agregado graúdo compreende o pedregulho natural ou a brita, oriunda do britamento de rochas estáveis, cuja granulometria apresenta diâmetro característico superior a 4,8 mm (ABNT NBR 7211, 2022).

FUSCO (2012) Ressalta que o valor de 4,8 mm estabelecido pela EB-4 refere-se, tecnicamente, ao diâmetro característico superior (dk) dos agregados, parâmetro essencial para sua correta classificação e aplicação em elementos estruturais de concreto. Para a determinação da composição granulométrica do agregado miúdo, realiza-se o ensaio de peneiramento. Esse procedimento consiste na utilização de sete peneiras de malha quadrada, por meio das quais a amostra é submetida à separação por faixas de tamanho. As porcentagens acumuladas em massa retidas em cada peneira são então comparadas aos limites estabelecidos pela Especificação Brasileira EB-4, conforme a distribuição padronizada indicada a seguir:

Tabela 1 – Limites da Distribuição Granulométrica do Agregado Miúdo.

PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	PORCENTAGEM, EM MASSA, RETIDA ACUMULADA			
	LIMITES INFERIORES		LIMITES SUPERIORES	
	ZONA UTILIZÁVEL	ZONA ÓTIMA	ZONA ÓTIMA	ZONA UTILIZÁVEL
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

NOTA 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

NOTA 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT NBR 7211 (2022).

3.1.3 Água e Aditivos

A água utilizada no amassamento do concreto deve estar isenta de substâncias que possam comprometer o desempenho do material, especialmente aquelas com potencial para interferir nas reações de hidratação ou causar degradação ao longo do tempo. Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), águas potáveis são presumidas como adequadas para esse fim, dada sua baixa concentração de compostos orgânicos e sais dissolvidos que poderiam ser prejudiciais à estrutura do concreto.

No caso de águas não potáveis, é imprescindível a realização de análises laboratoriais para verificar a concentração de matéria orgânica, sólidos dissolvidos, íons sulfato (SO_4^{2-}) e íons cloreto (Cl^-). Esses compostos, quando em excesso, podem comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto (ISAIA, 2010a). O controle desses elementos é essencial para assegurar que a água não interfira negativamente nas reações de hidratação do cimento nem na integridade das armaduras metálicas.

É importante destacar que certos agentes agressivos presentes na água de amassamento, quando em concentrações dentro dos limites estabelecidos pelas normas, apresentam efeito significativamente menos nocivo do que se atuassem sobre o concreto já endurecido. Isso se deve ao fato de que durante a hidratação do cimento muitos desses compostos são neutralizados, o que reduz seu potencial destrutivo (NEVILLE, 1995).

Contudo, íons cloreto, mesmo em fase plástica não são completamente neutralizados e, em concentrações elevadas continuam sendo prejudiciais, sobretudo por sua capacidade de difusão após o endurecimento da estrutura (HELENE; ANDRADE, 1993).

Outro aspecto crítico refere-se ao uso de aditivos químicos. A composição dos aditivos empregados na mistura deve ser rigorosamente controlada, especialmente no que tange à presença de compostos que possam introduzir íons cloreto ou sulfato no sistema. Aditivos como aceleradores de pega e endurecimento, bem como incorporadores de ar, devem ser avaliados quanto ao seu impacto na durabilidade da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dentre os contaminantes mais críticos está o íon cloreto (Cl^-), cuja presença é diretamente associada à corrosão das armaduras. A ação deletéria deste íon se dá pela ruptura da camada passivadora do aço em ambiente alcalino, favorecendo processos eletroquímicos corrosivos. Assim, a utilização de aditivos contendo cloretos é terminantemente proibida, conforme estabelecido pela NBR 11768 (ABNT, 2019), exceto em casos específicos onde se utilizam armaduras inoxidáveis ou protegidas com sistemas especiais.

3.1.4 Dosagem

A dosagem do concreto é o processo de definição das proporções dos materiais constituintes com o objetivo de atingir as propriedades desejadas no estado fresco e endurecido, garantindo desempenho, economia e durabilidade. A eficiência da dosagem influencia diretamente a resistência mecânica, a trabalhabilidade, a permeabilidade, a durabilidade e a sustentabilidade do concreto (ISAIA, 2010a).

A dosagem deve atender simultaneamente a diversos critérios: (1) resistência à compressão especificada (f_{ck}), (2) trabalhabilidade adequada ao método de lançamento e adensamento, (3) durabilidade conforme a exposição ambiental, (4) economia e (5) compatibilidade com os equipamentos e materiais disponíveis na obra. O principal parâmetro técnico de controle é a relação água/cimento (a/c), que influencia todas as propriedades do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A relação a/c ideal para concretos convencionais varia geralmente entre 0,40 e 0,60. Relações elevadas aumentam a porosidade e reduzem a resistência e a durabilidade, já relações muito baixas exigem maior quantidade de cimento ou uso de aditivos plastificantes para manter a trabalhabilidade (NEVILLE, 1995).

Diversos métodos de dosagem foram desenvolvidos ao longo do tempo com o objetivo de racionalizar e padronizar o processo de formulação de concretos, considerando fatores como resistência mecânica, durabilidade, economia e trabalhabilidade. Existem diferentes métodos para esse fim: ABCP/ACI; IPT/EPUSP; INT/Lobo Carneiro; ITERS/Petrucci e SNCF/Vallete. No Brasil, destacam-se os métodos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/EPUSP), amplamente utilizado no meio acadêmico e técnico pela sua abordagem prática e adaptável; o método da American Concrete Institute (ACI), bastante difundido internacionalmente e que utiliza parâmetros estatísticos associados ao desvio-padrão e resistência característica; e o método desenvolvido em parceria pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), que visa promover uma abordagem moderna e padronizada com base na experiência nacional. Cada um desses métodos possui particularidades quanto à seleção dos materiais, cálculo da relação a/c , consideração da trabalhabilidade e ajustes para diferentes condições de exposição, sendo essencial conhecê-los para definir a técnica mais adequada a cada aplicação.

Método IPT/EPUSP (Brasil): Desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), é um dos mais difundidos no país. Parte de um traço experimental e utiliza

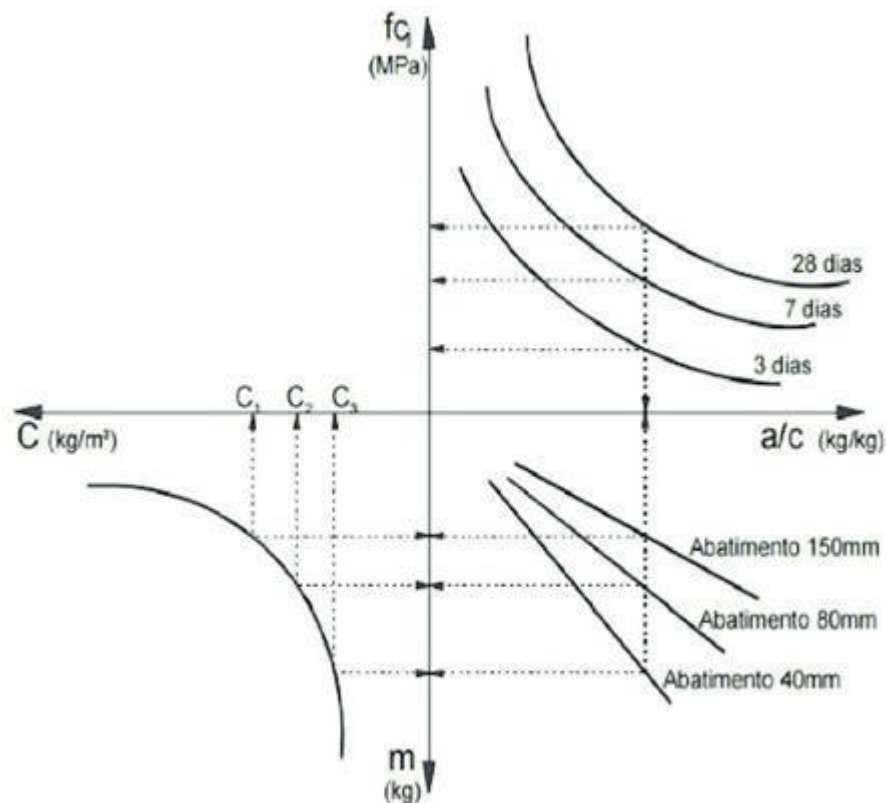
tabelas que relacionam consumo de cimento, fator a/c e abatimento desejado, realizando ajustes conforme os resultados obtidos em ensaios preliminares (ISAIA, 2010a).

A imagem abaixo exibe três quadrantes de dosagem usados no método IPT/EPUSP:

- Curvas $f_{ci} \times a/c$ para diferentes idades de rompimento (3, 7 e 28 dias);
- Curvas $m \times a/c$ e $m \times$ consumo de cimento;
- Pontos correspondentes a diferentes indivíduos de traços (rico, médio e pobre), com abatimentos-alvo (40 mm, 80 mm, 150 mm)

O método é frequentemente chamado de “4-quadrant method” e é valorizado pela sua simplicidade e eficácia na adaptação experimental dos traços às condições locais de materiais e aplicação.

Figura 1 – Diagrama de dosagem típico do Método IPT/EPUSP.



Fonte: (HELENE & TERZIAN, 1993).

Método ACI (American Concrete Institute): Muito usado internacionalmente, baseia-se em tabelas e equações fornecidas pelo ACI 211.1, definindo o volume absoluto de cada material por metro cúbico de concreto.

Método ABCP/IBRACON: Define a dosagem por meio de tabelas práticas que consideram o tipo de cimento, tipo e granulometria dos agregados, e tipo de aditivo.

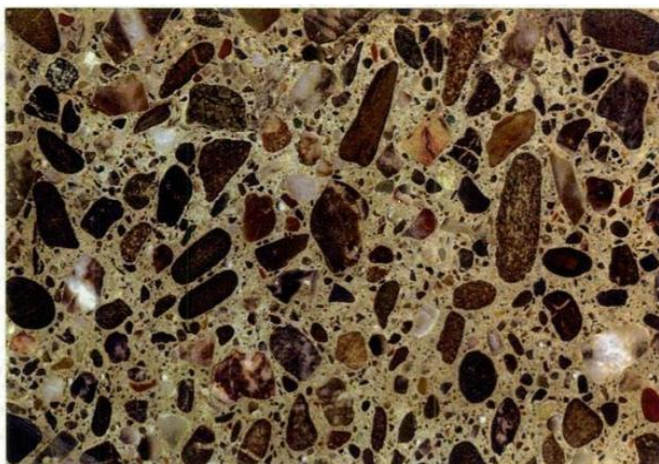
A dosagem do concreto está sujeita a variações decorrentes de fatores climáticos, propriedades intrínsecas dos materiais empregados e condições operacionais relacionadas ao transporte, lançamento e adensamento. Aspectos como a absorção de água pelos agregados, o tempo de mistura, a eficiência do adensamento e o tipo de fôrma utilizada exercem influência direta sobre a trabalhabilidade e o desempenho final do concreto. Tais fatores devem ser rigorosamente controlados e ajustados conforme necessário, a fim de garantir a homogeneidade da mistura e a conformidade com as propriedades especificadas em projeto estrutural (HELENE; TERZIAN, 1992).

3.1.5 Concreto no Estado Endurecido

O concreto, enquanto material compósito amplamente utilizado na construção civil, pode ser compreendido em diferentes escalas de análise, sendo comumente dividido em fases que incluem a pasta de cimento, os agregados e a zona de transição interfacial (ZTI). Essa estrutura heterogênea permite sua investigação tanto em nível macroestrutural, considerando o comportamento mecânico global do material, como em nível microestrutural, onde se avaliam aspectos como porosidade, microfissuração, hidratação dos compostos e a interação entre seus constituintes. Essa abordagem multiescalar é fundamental para compreender a influência das propriedades físico-químicas e dos mecanismos internos na performance final do concreto, especialmente em relação à durabilidade, resistência mecânica e deformabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A macroestrutura do concreto está relacionada à organização dos constituintes visíveis a olho nu, especialmente a distribuição dos agregados graúdos e miúdos, a homogeneidade da mistura e a integridade global do material endurecido. Essa estrutura está diretamente associada às propriedades geométricas da peça de concreto, como volume, área superficial e forma da seção transversal. Uma macroestrutura bem conformada depende de procedimentos adequados de dosagem, mistura, lançamento, adensamento e cura, impactando diretamente na resistência global e no desempenho estrutural da peça (HELENE; TERZIAN, 1992).

Figura 2 - Seção polida de um corpo de prova de concreto (Macroestrutura).



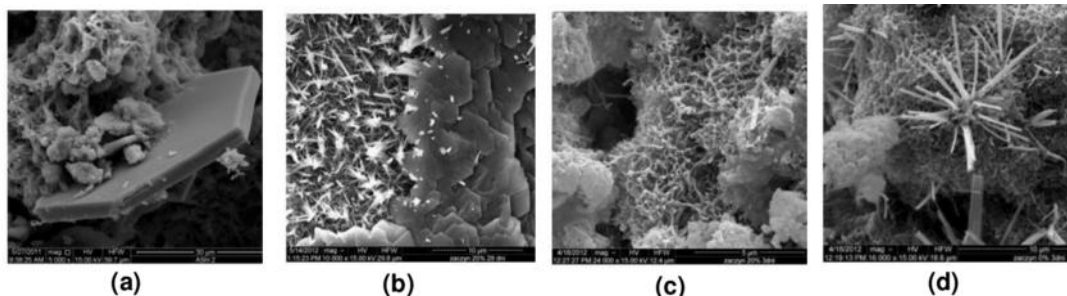
Fonte: (Fotografia cedida por Gordon Vrdoljak) (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

A microestrutura do concreto convencional refere-se à organização interna dos seus componentes em escala microscópica, incluindo a matriz cimentícia, os produtos de hidratação do cimento, os vazios (poros) e as zonas de transição interfacial (ZTI) entre a pasta e os agregados. A formação da microestrutura ocorre a partir das reações químicas entre o cimento Portland e a água, resultando principalmente na geração de hidratos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela resistência mecânica, e a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que contribui para a alcalinidade do meio. A distribuição e a morfologia dos poros e dos cristais influenciam diretamente propriedades como resistência mecânica, durabilidade, permeabilidade e retração do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Um aspecto crucial da microestrutura é a zona de transição interfacial (ZTI), localizada entre os agregados e a pasta de cimento. Esta região apresenta maior porosidade e acúmulo de hidróxidos de cálcio, sendo considerada o ponto mais fraco do compósito. A microestrutura da ZTI é afetada por fatores como relação água/cimento, tipo e granulometria dos agregados, adições minerais e métodos de cura. O controle tecnológico dessa região é fundamental para aumentar a coesão entre os materiais e reduzir a propagação de fissuras internas (ISAIA, 2010a).

Figura 3 – Microestrutura de uma pasta de cimento hidratada.

Morfologia de produtos hidratado do cimento Portland (a) cristais hexagonais de portlandita, (b) estruturas C-S-H na forma de agulhas e placas de portlandita, (c) estruturas C-S-H na forma de uma rede e, (d) etringita se expandindo sobre estruturas de C-S-H.



Fonte: (FRANUS, PANEK E WDOWIN, 2015).

A interação entre microestrutura e macroestrutura é determinante para o desempenho do concreto em serviço. Alterações na microestrutura, como o aumento da porosidade capilar ou a formação de microfissuras, podem comprometer a integridade da macroestrutura, afetando a resistência e a durabilidade da peça estrutural. Por isso, o controle simultâneo das escalas micro e macro é essencial para garantir a qualidade do concreto, especialmente em estruturas sujeitas a ambientes agressivos ou cargas cíclicas (NEVILLE, 1995).

3.1.6 Propriedades do concreto no estado endurecido

As propriedades do concreto no estado endurecido representam o comportamento do material após o processo de hidratação e ganho de resistência, sendo essas características fundamentais para o desempenho estrutural e a durabilidade das obras em concreto armado. Após a cura inicial, o concreto passa a suportar esforços mecânicos significativos, especialmente compressivos, embora apresente comportamento distinto em tração e flexão (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A resistência à compressão é a principal propriedade mecânica do concreto convencional e serve como referência para o dimensionamento estrutural e controle de qualidade. Ela é determinada por meio de ensaios destrutivos em corpos de prova cilíndricos, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), normalmente com idade de 28 dias. Os valores típicos para concreto convencional variam entre 20 MPa e 40 MPa, (NEVILLE, 1995).

Embora a resistência à compressão seja elevada, o concreto possui baixa resistência à tração, da ordem de 8% a 12% da resistência à compressão. Por esse motivo, é comum a associação com armaduras de aço nas zonas tracionadas da estrutura. A resistência à tração pode ser obtida por métodos diretos ou indiretos, como o ensaio de tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222, 2011) e o ensaio de tração na flexão (ABNT NBR 12142, 2010) (ISAIA, 2010a).

O módulo de elasticidade longitudinal é uma propriedade fundamental do concreto, pois caracteriza a sua rigidez sob ação de carregamentos e está diretamente relacionada ao comportamento deformacional do material. Esse parâmetro varia de acordo com a composição da mistura, a idade do concreto, as condições de cura e, especialmente, a natureza e proporção dos agregados utilizados. Para concretos convencionais com resistência característica à compressão (f_{ck}) entre 25 MPa e 30 MPa, os valores típicos do módulo de elasticidade situam-se na faixa de 25 a 30 GPa. A determinação experimental desse parâmetro deve seguir os procedimentos normatizados pela NBR 8522, que estabelece o método de ensaio para obtenção do módulo de elasticidade estático tangente inicial (ABNT NBR 8522, 2015).

A fluência, definida como a deformação lenta e progressiva do concreto sob tensão constante, pode comprometer a estabilidade estrutural de elementos submetidos a carregamentos permanentes, como vigas e lajes. Já a retração é a contração volumétrica resultante da perda de água, podendo gerar fissuras em elementos longos e esbeltos. Ambas devem ser consideradas nos projetos estruturais e mitigadas por meio de juntas, armaduras de controle e cura eficiente (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A resistência à abrasão, ao impacto, à permeabilidade e à fadiga são propriedades fundamentais do concreto endurecido, especialmente relevantes em obras submetidas a solicitações mecânicas intensas, como pavimentos rodoviários e industriais, estruturas hidráulicas e infraestruturas portuárias. A resistência à abrasão, em particular, está diretamente relacionada à dureza dos agregados empregados e à qualidade da pasta cimentícia, aspectos que influenciam a durabilidade e o desempenho superficial do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A permeabilidade do concreto, associada intrinsecamente à sua durabilidade, está condicionada à compacidade da matriz cimentícia e à distribuição e continuidade dos poros no interior do material endurecido. Tal propriedade é fortemente influenciada pelo fator água/cimento (a/c), pelo uso de adições minerais (como sílica ativa ou metacaulim) e pelas

condições de cura, que afetam diretamente a formação da microestrutura do concreto (ISAIA, 2010a).

De modo geral, o desempenho do concreto em estado endurecido está condicionado a diversos fatores, entre os quais destacam-se a composição da mistura, a eficiência do processo de cura, a idade da estrutura e as condições ambientais de exposição. O controle tecnológico, tanto em laboratório quanto em campo, constitui ferramenta indispensável para assegurar que as propriedades mecânicas e os requisitos de durabilidade sejam atingidos conforme as especificações do projeto estrutural (HELENE; TERZIAN, 1992).

3.1.7 Propriedades do concreto no estado fresco

As propriedades do concreto no estado fresco dizem respeito ao comportamento da mistura imediatamente após a homogeneização, até o início da pega do cimento. Essas características influenciam diretamente a facilidade de lançamento, adensamento, acabamento e a qualidade final da estrutura. Para o concreto convencional, é fundamental que o material apresente trabalhabilidade, coesão e estabilidade adequadas ao método de aplicação e às características geométricas dos elementos estruturais (ISAIA, 2010a).

A trabalhabilidade é definida como a facilidade com que o concreto fresco pode ser misturado, transportado, lançado e adensado, sem apresentar segregação ou exsudação. Trata-se de uma propriedade de natureza subjetiva, que pode ser quantificada por meio de ensaios como o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*). Os valores de abatimento recomendados para o concreto convencional usualmente situam-se entre 50 mm e 100 mm variando conforme a densidade da armadura e o tipo de aplicação estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com a norma a ABNT NBR 8953 (2015) – Concreto para fins estruturais – classificação por consistência, as classes oficiais de consistência são:

- Classe S10: abatimento entre 10 mm e menos de 50 mm – adequado para concretos secos ou com baixa fluidez, como aqueles usados em vibroprensagem ou tubos.
- Classe S50: abatimento entre 50 mm e menos de 100 mm – comum em concretos plásticos para estruturas convencionais.

O ensaio de abatimento de tronco de cone, também conhecido como *slump test*, é amplamente utilizado e reconhecido como método padrão para determinação da consistência do concreto no estado fresco. Esse procedimento é regulamentado pela ABNT NBR 16889 (2022).

O método consiste no preenchimento de um molde em forma de cone truncado com concreto fresco, em cada três camadas de alturas iguais. Cada camada é adensada com 25 golpes de uma haste metálica, conforme prescrito na norma. Após o preenchimento e adensamento, o molde é cuidadosamente removido na direção vertical e mede-se a diferença de altura entre o corpo de prova moldado e o molde original, identificando-se o abatimento do concreto (*slump*), conforme ilustrado na figura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 4 - Procedimento *Slump-Test*.

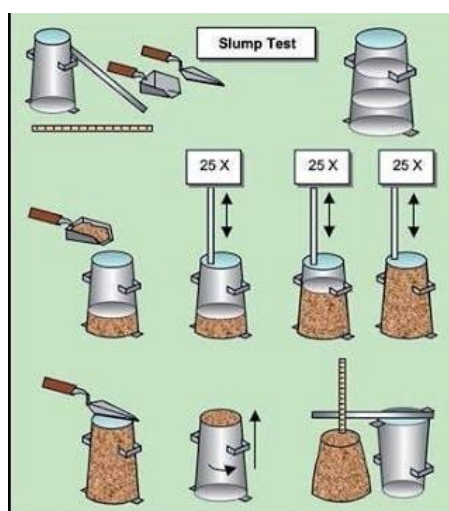


Figura 5 - Configuração Típica *Slump-Test*.



Fonte: (MELLO, 2024).

A consistência do concreto está diretamente associada ao seu teor de água e ao emprego de aditivos plastificantes. Uma mistura excessivamente seca pode dificultar o adensamento, gerar vazios e comprometer a resistência mecânica. Por outro lado, um teor de água elevado pode acarretar segregação dos materiais e perda da coesão. A coesão está relacionada à homogeneidade da mistura e à capacidade de manter os agregados bem distribuídos na matriz cimentícia durante o manuseio e aplicação (NEVILLE, 1995).

A exsudação é outra característica relevante no estado fresco, representando a migração da água livre para a superfície da massa de concreto após o lançamento. Quando em excesso pode indicar mistura mal dosada, levando à formação de fissuras plásticas e redução da aderência com as armaduras. Além disso, a exsudação facilita a segregação dos componentes (cimento, areia, brita), afetando a homogeneidade da mistura e comprometendo o desempenho estrutural do concreto endurecido (ISAIA, 2010a).

As propriedades reológicas do concreto fresco, como a viscosidade plástica e a tensão de escoamento, têm sido crescentemente estudadas por meio de reômetros, sobretudo no caso dos concretos auto adensáveis. No entanto, para concretos convencionais, o ensaio de abatimento ainda permanece como o método mais amplamente empregado para o controle da fluidez (HELENE; TERZIAN, 1992).

O controle rigoroso das propriedades no estado fresco é essencial para assegurar a durabilidade e resistência da estrutura. A dosagem adequada dos materiais, aliada ao uso racional de aditivos, desempenha papel fundamental na prevenção de manifestações patológicas e na melhoria das características do concreto, mesmo em fases iniciais da aplicação (ABNT NBR 12655, 2022).

3.1.8 Avanços Tecnológicos e Tendências

O desenvolvimento tecnológico tem impulsionado significativas inovações na produção, aplicação e controle do concreto convencional, ampliando suas possibilidades de uso e eficiência. A busca por sustentabilidade, produtividade, precisão e durabilidade vem estimulando o surgimento de novos materiais, processos construtivos e ferramentas de controle inteligente aplicadas ao concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Uma das principais tendências atuais é o desenvolvimento de concretos com menor impacto ambiental, como os concretos verdes. Esses concretos utilizam elevados teores de materiais cimentícios suplementares (MCS), como escória de alto-forno, cinzas volantes,

metacaulim e sílica ativa, substituindo parcialmente o clínquer e reduzindo significativamente as emissões de CO₂ da indústria cimenteira. Estudos também apontam para o uso promissor de pozolanas naturais e resíduos da construção civil na formulação de concretos sustentáveis (ISAIA, 2010b).

A impressão 3D com concreto é outra inovação emergente, permitindo a construção automatizada de elementos arquitetônicos e estruturais com geometrias complexas, sem o uso de formas convencionais. Essa tecnologia exige concretos com propriedades reológicas muito específicas, com elevada coesão, controle de tixotropia e resistência inicial suficiente para suportar as camadas subsequentes (BUSWELL et al., 2018).

O uso de fibras metálicas e sintéticas em concretos convencionais tem ganhado destaque como forma de melhorar o desempenho à tração, a resistência ao impacto e a tenacidade. O concreto reforçado com fibras (CRF) é utilizado em pisos industriais, túneis, painéis pré-moldados e estruturas sujeitas a cargas dinâmicas. A adição de fibras também pode reduzir a necessidade de armaduras convencionais em algumas aplicações (NEVILLE, 1995).

A automação do processo de dosagem e o uso de inteligência artificial para ajuste do traço também representam avanços importantes. Algoritmos de aprendizado de máquina vêm sendo empregados para prever propriedades do concreto com base nas características dos materiais e parâmetros de mistura, otimizando o desempenho e reduzindo custos e desperdícios. Sistemas de monitoramento em tempo real com sensores embutidos também permitem acompanhar a cura, variações térmicas e possíveis fissuras nas estruturas (GARCÍA et al., 2020).

Um dos avanços mais relevantes no campo dos materiais cimentícios é a aplicação de nanomateriais, como nanotubos de carbono e nanopartículas de sílica, que promovem a compactação da matriz cimentícia, aumentando significativamente a resistência mecânica, reduzindo a porosidade e aprimorando a durabilidade do concreto. Tais adições elevam o desempenho estrutural do compósito, embora seu uso em larga escala ainda seja limitado pelos elevados custos associados à produção e incorporação desses materiais (SOBRINHO; LIBÂNIO; SOUSA, 2019).

No contexto da industrialização da construção civil, destaca-se o avanço das centrais dosadoras de concreto (CDCs), que passaram a operar com sistemas automatizados de pesagem, controle da umidade dos agregados, dosagem de aditivos e rastreamento digital de toda a produção. Esse nível de automação proporciona significativa melhoria na qualidade do concreto

produzido, ao reduzir as variações no traço e aumentar a eficiência do processo logístico (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Essas inovações tecnológicas evidenciam que o concreto convencional, embora tradicional, continua a evoluir de forma contínua. Sua capacidade de adaptação às exigências contemporâneas — sejam elas de ordem ambiental, produtiva ou tecnológica — reforça sua posição estratégica nas construções do futuro. Essa resiliência tecnológica contribui para sua competitividade frente a materiais alternativos e sistemas construtivos inovadores (SILVA et al., 2020).

3.2 Concreto Reforçado com Fibras

A utilização de fibras como material de reforço remonta à antiguidade, quando crina de cavalo e palha eram incorporadas à argamassa e à fabricação de tijolos de barro para melhorar sua resistência. Com o avanço tecnológico, no início do século XX, fibras de amianto passaram a ser introduzidas no concreto. A partir da década de 1950, com o desenvolvimento dos materiais compósitos, o concreto reforçado com fibras (CRF) passou a ser amplamente estudado. Contudo, os riscos à saúde associados ao amianto motivaram pesquisas por alternativas seguras para sua substituição em materiais cimentícios (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Na década de 1960, fibras de vidro (GFRC) e fibras sintéticas, como as de polipropileno, foram incorporadas ao concreto como forma de reforço. Desde então, pesquisas voltadas ao desenvolvimento de concretos reforçados com diferentes tipos de fibras têm se intensificado, consolidando esse campo como uma importante área da engenharia de materiais (ACI COMMITTEE 544, 2009).

Registros mais recentes indicam que, em 1911, Graham utilizou fibras de aço no concreto armado com o intuito de aumentar sua resistência e estabilidade. Entretanto, os primeiros estudos científicos sistematizados sobre o tema surgiram em 1920 com Griffith, e foram posteriormente aprofundados em 1963 por pesquisadores como Romualdi e Batson, que estabeleceram as bases para o estudo moderno do concreto reforçado com fibras (ROMUALDI; BATSON, 1963).

Na década de 1970, a aplicação do concreto reforçado com fibras ganhou destaque na Espanha, especialmente em obras de infraestrutura, como pavimentação de tabuleiros de pontes, pisos industriais, túneis e obras portuárias. As aplicações em revestimentos de túneis e

taludes com concreto reforçado por fibras de aço têm se mostrado particularmente eficazes, com resultados técnicos e econômicos satisfatórios (SANTOS et al., 2017).

Os concretos reforçados com fibras (CRF) são caracterizados por conterem fibras descontínuas, distribuídas aleatoriamente na matriz cimentícia, contribuindo para a melhoria do comportamento mecânico e da durabilidade do material (ACI COMMITTEE 544, 2009).

Segundo o ACI (American Concrete Institute), o concreto reforçado com fibras é um compósito constituído por cimento hidráulico, agregados finos ou graúdos e fibras discretas e descontínuas incorporadas à massa, conferindo ao compósito propriedades distintas em relação ao concreto convencional (ACI COMMITTEE 544, 2009).

As fibras utilizadas são geralmente de pequena seção transversal e comprimento reduzido, sendo incorporadas ao concreto para aprimorar características específicas, como resistência à tração, ductilidade e controle de fissuração (SILVA; FIGUEIREDO, 2021).

Do ponto de vista estrutural, as fibras elevam a energia de ruptura do compósito, podendo inclusive substituir total ou parcialmente as armaduras em determinadas situações. Mesmo quando não exercem função estrutural primária, as fibras promovem benefícios como maior resistência ao impacto, abrasão, retração por secagem e controle de fissuras (JOHN; AGOPYAN, 1993).

Em aplicações estruturais, o uso de fibras visa obter benefícios adicionais, como a redução da mão de obra, aumento da durabilidade e diminuição da necessidade de armaduras convencionais, favorecendo a racionalização do processo construtivo (FANTILLI; CHIAIA, 2013). Representando um avanço significativo na engenharia civil contemporânea, fornecendo uma alternativa eficiente para superar as limitações do concreto convencional, especialmente no controle de fissuração, resistência ao impacto e aumento da durabilidade. A incorporação de diferentes tipos de fibras — como aço, poliméricas, vidro, naturais e híbridas — permite ajustar as propriedades do concreto de acordo com as exigências específicas de cada aplicação (ISAIA, 2010b).

As fibras promovem um comportamento mais dúctil e resiliente frente às solicitações cíclicas e dinâmicas, aumentando a segurança e a vida útil das estruturas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As aplicações práticas demonstradas em estudos de caso comprovam a viabilidade econômica e técnica do CRF em diferentes frentes da construção civil, como pisos industriais, túneis, pré-moldados, obras hidráulicas e habitações populares. Além disso, os avanços na

tecnologia de materiais e nos processos de fabricação de fibras vêm ampliando ainda mais seu campo de aplicação e otimizando seus benefícios (FIGUEIREDO, 2011).

A adoção do CRF exige conhecimento técnico adequado, tanto para a seleção das fibras quanto para o dimensionamento e controle tecnológico do concreto. A integração entre pesquisa acadêmica, desenvolvimento industrial e normatização é essencial para consolidar o uso das fibras como uma solução segura e eficiente em projetos de engenharia (HELENE; TERZIAN, 2007).

Portanto, o concreto reforçado com fibras configura-se como uma tecnologia promissora e em constante evolução, contribuindo para construções mais duráveis, sustentáveis e resilientes. A tendência é de crescimento de sua aplicação, especialmente diante das exigências por estruturas com melhor desempenho mecânico, menor manutenção e maior durabilidade frente aos desafios ambientais e operacionais contemporâneos (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2012).

3.2.1 Tipos de Fibras

A prática de incorporação de fibras ao concreto busca atender não apenas a requisitos mecânicos, mas também a aspectos de durabilidade e integridade superficial, oferecendo soluções específicas para diferentes tipos de solicitações e ambientes de exposição. Entre as alternativas disponíveis, destacam-se dois grupos principais: macrofibras e microfibras, que, embora compartilhem o objetivo de melhorar o comportamento do compósito, apresentam dimensões, materiais e funções distintas. A compreensão dessas diferenças é essencial para garantir a escolha correta da fibra e, consequentemente, a eficiência do reforço pretendido, (ZAINAL, HEJAZI e MAFAILEH, 2023)

Macrofibras para concreto são elementos fibrosos de maior comprimento e diâmetro, utilizados com o objetivo principal de substituir total ou parcialmente as armaduras convencionais na contenção de fissuras e na absorção de tensões após a fissuração do concreto endurecido. Essas fibras geralmente possuem comprimento superior a 30 mm e são empregadas para aumentar a tenacidade, resistência à tração residual e ductilidade do compósito. Macrofibras sintéticas, como as de polipropileno, e macrofibras metálicas, como as de aço com superfície ancorada, são amplamente utilizadas em pisos industriais, túneis e estruturas de concreto projetado (MACCAFERRI, 2007). De acordo com MEHTA e MONTEIRO (2014), a

adição dessas fibras contribui para a redistribuição das tensões e melhora o comportamento do concreto sob cargas repetidas ou dinâmicas.

Microfibras, por sua vez, são fibras com menor comprimento e diâmetro, geralmente abaixo de 30 mm, que atuam predominantemente no controle de fissuração plástica e de retração no estado fresco do concreto. Elas não substituem as armaduras estruturais, mas desempenham um papel essencial na melhora da coesão da mistura e na resistência à segregação e à exsudação. Microfibras de polipropileno são amplamente utilizadas devido ao seu baixo custo, elevada dispersibilidade e resistência química. Segundo BENTUR e MINDESS (2007), essas fibras ajudam a reduzir significativamente a formação de microfissuras nas primeiras horas após a aplicação, contribuindo para a durabilidade do concreto. MACCAFERRI (2007) também destaca que microfibras não influenciam significativamente a resistência mecânica final, mas desempenham papel fundamental na integridade superficial das estruturas.

A principal diferença entre macrofibras e microfibras está relacionada à sua função no concreto e às propriedades físicas que influenciam seu desempenho. Enquanto as macrofibras atuam no concreto endurecido, melhorando a resistência à tração residual e o controle de fissuras após o início da fissuração, as microfibras atuam no estado fresco, prevenindo a formação de fissuras plásticas e promovendo a homogeneidade da mistura. Ambas contribuem para a durabilidade e desempenho do concreto, mas em estágios distintos do ciclo de vida da estrutura. Como ressaltado por NUNES et al. (2019), a escolha adequada entre micro e macrofibras deve considerar o tipo de aplicação, o ambiente de exposição e as solicitações estruturais envolvidas.

De forma geral, as fibras utilizadas no concreto podem ser classificadas em naturais, artificiais ou sintéticas. As fibras artificiais, por sua vez, subdividem-se em orgânicas e inorgânicas. Dentre as inorgânicas, destacam-se as de carbono (CF), vidro (GF), cerâmica (CEF) e metal (MTF), que diferem entre si pela composição físico-química, resistência mecânica e comportamento frente a agentes agressivos (JUNIOR; ROCHA, 2011).

Tabela 2 – Tipos de Fibras mais comuns e suas propriedades.

Tipo de Fibra	Diâmetro Equivalente (mm)	Densidade (kg/m³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alongamento de Ruptura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0.0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodão	0.2-0.6	1500	400-700	4.8	3-10
Vidro	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramida	0.01	1450	3500-3600	65-133	2.1-4
Nylon	0.02-0.4	1100	760-820	4.1	16-20
Poliéster	0.02-0.4	1400	720-860	8.3	11-13
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	3.5-15	5-25
Polivinil álcool	0.027-0.660	1300	900-1600	23-40	7-8
Carbono	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Rayón	0.02-0.38	1500	400-600	6.9	10-25
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56
Polietileno	0.025-1	960	200-300	5.0	3
Sisal	0.08-0.3	760-1100	228-800	11-27	2.1-4.2
Coco	0.11-0.53	680-1020	108-250	2.5-4.5	14-41
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Aço	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10

Fonte: (ACI 544.5R-10, 2010).

As fibras naturais, provenientes de fontes vegetais como bambu, sisal, juta e coco, oferecem vantagens ambientais devido à sua biodegradabilidade e renovabilidade. Contudo, apresentam algumas limitações, como menor durabilidade em meios alcalinos e suscetibilidade ao ataque microbológico. Seu uso é recomendado especialmente em aplicações de baixo custo e em regiões onde essas fibras estão facilmente disponíveis, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental da construção (AGOPYAN; JOHN, 2011).

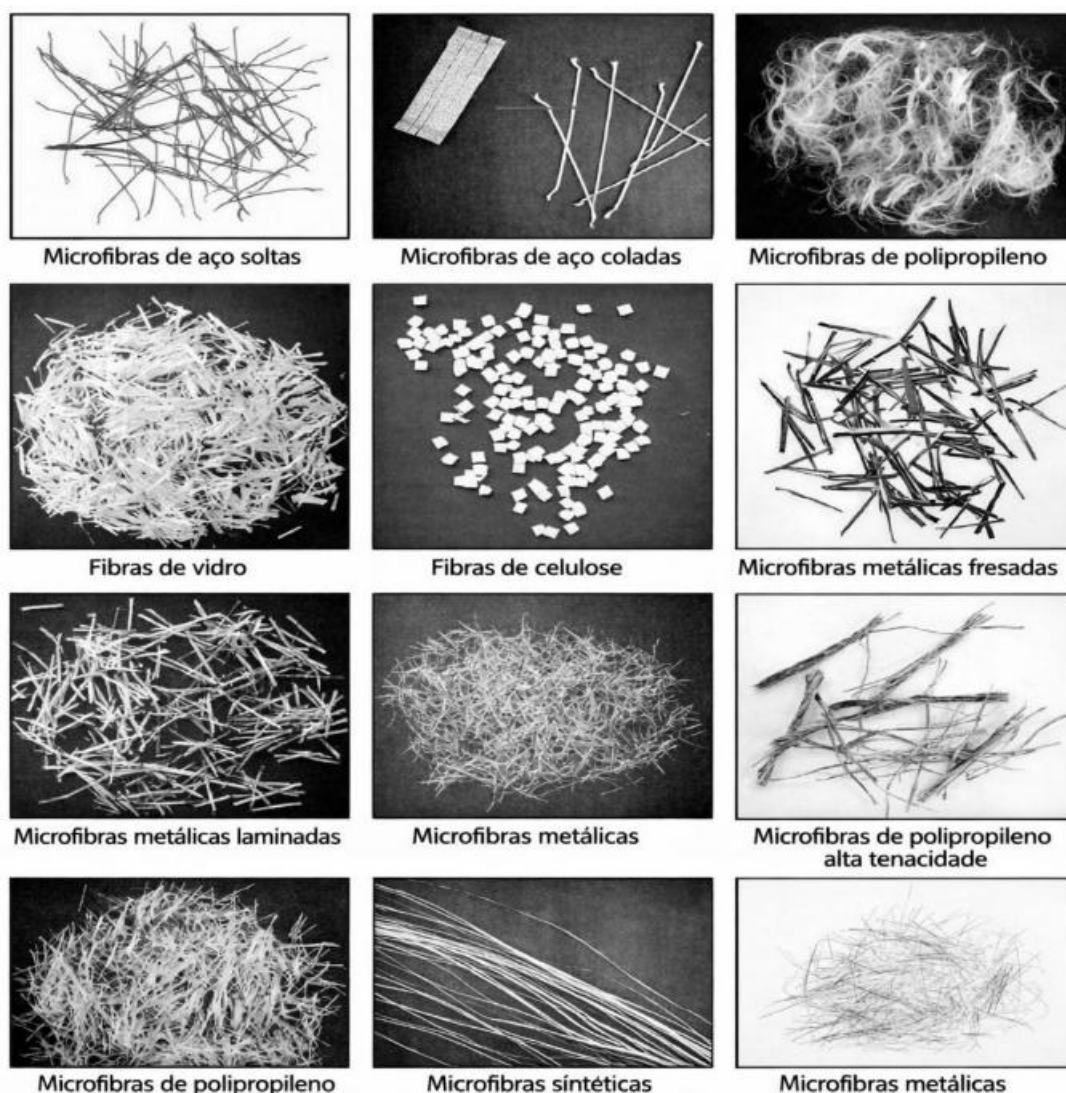
As fibras metálicas, especialmente as de aço, são amplamente empregadas devido à sua alta resistência à tração e excelente aderência à matriz cimentícia. Essas fibras proporcionam aumento significativo da resistência pós-fissuração, tenacidade, ductilidade e resistência ao impacto, sendo frequentemente utilizadas em estruturas industriais, pavimentos de alta resistência, túneis e elementos pré-fabricados (JOHNSTON, 1994).

As fibras sintéticas, como as de polipropileno, polietileno e nylon, destacam-se pela boa resistência química, baixa densidade e excelente capacidade para controlar fissuras de retração plástica e por secagem. No entanto, geralmente apresentam menor resistência mecânica

comparadas às fibras metálicas. São empregadas principalmente em concretos para pisos industriais, elementos arquitetônicos e em estruturas expostas a ambientes quimicamente agressivos (BARROS, 2009).

Por último, as fibras híbridas consistem na combinação de diferentes tipos de fibras, visando obter benefícios combinados e compensar limitações específicas de cada tipo isoladamente. Frequentemente, fibras metálicas são associadas a fibras sintéticas ou naturais para melhorar simultaneamente resistência mecânica, controle de fissuras e durabilidade, otimizando o desempenho global do concreto (FANTILLI; CHIAIA, 2013).

Figura 6 - Alguns tipos de fibras no mercado.



Fonte: Adaptado de MACCAFERRI (2007).

Segundo SILVA, TOLEDO FILHO e FAIRBAIRN (2011), a escolha adequada do tipo de fibra, aliada ao conhecimento técnico e às exigências do projeto, é essencial para garantir os benefícios esperados do concreto reforçado com fibras. Ensaios experimentais e simulações computacionais vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de compreender melhor o comportamento conjunto das fibras na matriz cimentícia e ampliar suas aplicações na construção civil contemporânea.

3.2.2 Vantagens do uso de Fibras no Concreto

O concreto simples apresenta limitações expressivas quanto à sua fragilidade frente à tração, alterações térmicas e efeitos de retração hidráulica. GÓIS (2010) destaca que esse tipo de concreto possui microfissuras na zona de transição entre a matriz e os agregados, sendo necessária pequena quantidade de energia para a propagação dessas fissuras. A adição de fibras ao concreto, em quantidade e módulo adequados, contribui significativamente para a mitigação desse comportamento frágil.

No interior do concreto, as tensões decorrentes das ações estruturais podem gerar fissuras. Conforme FIGUEIREDO (2000), ao surgir uma fissura em concreto simples, esta tende a se propagar, comprometendo a integridade estrutural. A tensão que atravessava a seção fissurada migra para outra região, intensificando a abertura da fissura até o rompimento brusco do material (BARROS, 2009).

Uma das principais vantagens do reforço proporcionado pelas fibras é sua capacidade de se distribuírem aleatoriamente na matriz do concreto, promovendo o reforço de toda a peça estrutural, diferentemente das armaduras convencionais, que atuam em posições específicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.2.3 Mecanismo de atuação das fibras no controle de fissuras

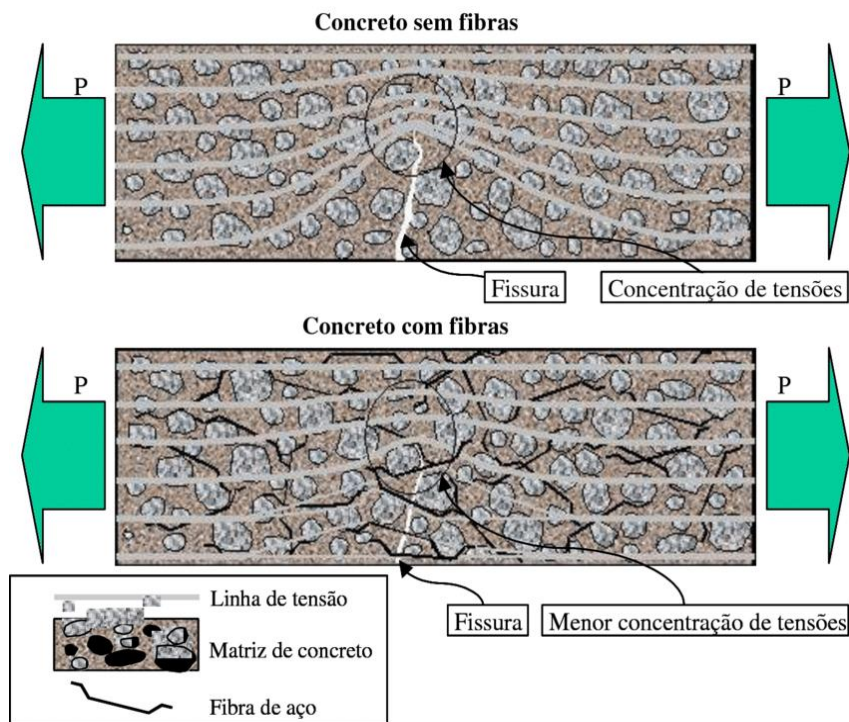
A adição de fibras atua como um mecanismo de contenção da propagação dessas fissuras. Segundo GÓIS (2010), as fibras funcionam como pontes de ligação entre as extremidades da fissura, redistribuindo as tensões ao longo da matriz cimentícia e retardando o processo de deterioração estrutural.

Com isso, a propagação das fissuras é significativamente reduzida, exigindo maior quantidade de energia para o seu avanço, o que proporciona ao material um comportamento pseudo-dúctil. De acordo com WATANABE (2008), fibras suficientemente resistentes, bem

distribuídas e em quantidade adequada conferem ao concreto reforçado com fibras (CRF) alta capacidade de deformação após a fissuração, por meio do fenômeno conhecido como “strain softening”.

Segundo FIGUEIREDO (IBRACON, 2005) no entanto, em elementos estruturais com esforços bem localizados, como no caso de vigas biapoiadas, onde as tensões de tração se concentram na região inferior, o uso de fibras se torna tecnicamente inviável, uma vez que estas não conseguem substituir as barras de aço de forma eficaz e econômica. As armaduras convencionais, por sua vez, podem ser dispostas de maneira precisa para otimizar o reforço onde ele é mais necessário. Assim, o emprego do concreto reforçado com fibras mostra-se vantajoso em estruturas de comportamento contínuo, como pavimentos e revestimentos de túneis, nos quais existe a possibilidade de redistribuição dos esforços, que não se concentram em uma única região da estrutura.

Figura 7 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem e com reforço de fibras.



Fonte: FIGUEIREDO (IBRACON, 2005).

3.3 Fibras de Aço

As fibras de aço são, sem dúvida, as mais tradicionais e amplamente utilizadas no concreto reforçado com fibras, devido à sua elevada resistência mecânica e excelente capacidade de ancoragem na matriz cimentícia. São especialmente eficazes no controle de fissuras ativas e passivas e no aumento da resistência residual do concreto após a fissuração. As fibras de aço são aplicadas em obras de grande exigência estrutural, como túneis, pisos industriais, pavimentos rígidos, estruturas pré-moldadas e concreto projetado (ISAIA, 2010b).

Além de sua eficácia no controle da fissuração, as fibras metálicas também promovem melhorias significativas nas propriedades mecânicas do compósito. Segundo JOHNSTON (1994), quando incorporadas à matriz cimentícia, as fibras reforçam o material frente às ações que geram tração, como retração restrita, flexão e cisalhamento. Além disso, contribuem para o aumento da ductilidade, tenacidade e resistência ao cisalhamento, torção e fadiga, superando o desempenho do concreto convencional. Conforme HELENE e TERZIAN (2007) esses benefícios são ainda mais notáveis quando as fibras substituem parcial ou totalmente armaduras convencionais, gerando economia e agilidade na execução.

Apesar de suas vantagens, é necessário considerar cuidados no uso de fibras de aço. A presença de grande quantidade pode afetar a trabalhabilidade da mistura e exigir o uso de aditivos para garantir a homogeneidade. Além disso, em ambientes altamente agressivos, como estruturas submersas ou em contato com cloretos, é fundamental utilizar fibras com proteção superficial (zinco, epóxi) ou optar por aços inoxidáveis para evitar problemas de corrosão. Com esses cuidados, as fibras de aço tornam-se ferramentas versáteis e de alto desempenho na engenharia estrutural moderna (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.3.1 Tipos e Formatos

As fibras metálicas utilizadas em concretos reforçados são produzidas em uma ampla gama de formatos e comprimentos, sendo os mais comuns: fibras retilíneas, onduladas, torcidas, com extremidades ancoradas em forma de gancho e com superfícies rugosas. A geometria e o formato dessas fibras desempenham um papel crucial na sua capacidade de ancoragem mecânica à matriz cimentícia. Estudos demonstram que fibras com deformações, como ganchos ou ondulações, apresentam desempenho superior em termos de resistência, resultando em melhor resposta à tração e maior absorção de energia de fratura. A escolha do tipo geométrico

de fibra deve estar alinhada às solicitações mecânicas específicas da estrutura e à natureza do carregamento (JO, M. L.; KIM, J. H., 2020).

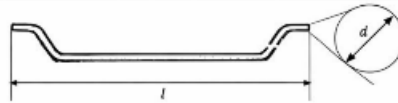
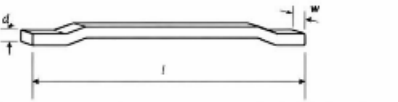
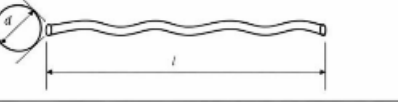
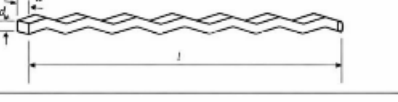
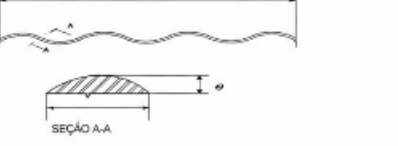
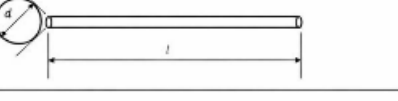
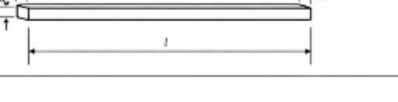
Para regulamentar a aplicação dessas fibras no Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) institui a norma ABNT NBR 15530 em 2007, intitulada “Fibras de aço para concreto – Especificação”. Essa norma estabelece parâmetros fundamentais como a classificação das fibras com base na geometria do perfil longitudinal e na origem do material de fabricação. A norma ainda define critérios para desempenho mecânico, processos de fabricação, ensaios e formas de aplicação. Tal classificação técnica é fundamental para garantir a correta aplicação das fibras no concreto e assegurar o desempenho estrutural esperado (FIGUEIREDO et al., 2008).

Segundo a ABNT NBR 15530 (2019), as fibras de aço são classificadas em três tipos básicos de acordo com a forma geométrica: Tipo A, que corresponde a fibras com ancoragens nas extremidades; Tipo C, que inclui fibras de aço corrugadas; e Tipo R, que se refere às fibras retilíneas. Essa distinção permite o controle sobre a forma como as fibras interagem com a matriz cimentícia, principalmente no que tange à transferência de tensões e ao controle de fissuração, aspectos fundamentais para o desempenho estrutural de elementos submetidos a solicitações mecânicas complexas (NILSON; DARWIN; DOLAN, 2010).

Além da geometria, o tipo de aço utilizado na produção das fibras também influencia suas propriedades mecânicas e sua eficiência no concreto. De acordo com a mesma norma, o aço pode ser trefilado a frio ou laminado a quente. O que origina diferentes classes de fibras. São elas: Classe I, que corresponde a fibras obtidas a partir de arame trefilado; Classe II, produzida a partir de chapa laminada cortada a frio; e Classe III, que utiliza arame trefilado posteriormente escarificado. Essa diferenciação visa compatibilizar as características físico-mecânicas das fibras às exigências estruturais específicas, promovendo maior desempenho em termos de resistência à tração e durabilidade (SORELLI et al., 2013; GRÜNEWALD; WALRAVEN, 2001).

A compreensão da interação do tipo, a classe e a geometria das fibras com a matriz cimentícia é essencial para garantir a eficiência do concreto reforçado com fibras. Essa sinergia entre os componentes contribui significativamente para a tenacidade, ductilidade, controle de fissuras e resistência pós-fissuração, tornando o CRF uma alternativa promissora para elementos estruturais solicitados à tração, flexão ou impactos (AFPC-AFREM, 2002; BENTUR; MINDESS, 2007).

Tabela 3 – Tipo, Classe e Geometria das Fibras de Aço.

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: (ABNT NBR 15530, 2019).

Quanto às propriedades físicas, as fibras de aço apresentam módulo de elasticidade superior a 200 GPa e resistência à tração que varia entre 1000 MPa e 2000 MPa, dependendo do processo de fabricação. Essa alta resistência permite que as fibras suportem tensões significativas antes da ruptura, funcionando como pontes de transferência de carga entre as faces das fissuras. Como resultado, o concreto apresenta comportamento pseudo-ductil, mesmo após o pico de resistência, e maior capacidade de absorção de energia (BENTUR; MINDESS, 2007).

Tabela 4 – Níveis de resistência mínima das Fibras de Aço para cada Classe.

Fibra	Limite de resistência à tração do aço MPa (*)fu
A I	1000
A II	500
C I	800
C II	500
C III	800
R I	1000
R II	500

(*) Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente final imediatamente antes do corte.

Fonte: (ABNT NBR 15530, 2019).

3.3.2 Propriedades Mecânicas

As fibras de aço são amplamente reconhecidas por suas elevadas propriedades mecânicas, especialmente em termos de resistência à tração, módulo de elasticidade e capacidade de absorção de energia. Essas características tornam o material altamente eficiente para reforçar concretos, promovendo uma melhora significativa na capacidade de resistência pós-fissuração. As fibras de aço, ao serem distribuídas tridimensionalmente na matriz cimentícia, atuam no controle de fissuras e no aumento da tenacidade do compósito, proporcionando comportamento pseudo-dúctil ao concreto antes frágil (ACI COMMITTEE 544, 2009).

Uma das principais contribuições das fibras de aço ao concreto está na resistência à tração na flexão. Estudos demonstram que, após a fissuração da matriz, essas fibras continuam transferindo esforços entre as faces da trinca, resultando em uma curva tensão-deformação mais estável e prolongada. Essa atuação pós-fissura é essencial em estruturas submetidas a cargas dinâmicas, impactos ou solicitações cíclicas, garantindo maior integridade estrutural ao longo do tempo (FANTILLI; CHIAIA, 2013).

Além disso, as fibras de aço apresentam módulo de elasticidade elevado, normalmente acima de 200 GPa, o que as torna altamente compatíveis com o comportamento mecânico do concreto. Isso significa que, ao contrário de fibras poliméricas ou sintéticas, as fibras metálicas acompanham de forma mais eficaz as deformações iniciais da matriz, contribuindo para a rigidez global do compósito e para a limitação das aberturas de fissuras desde os estágios iniciais de carregamento (YOO; BANTHIA, 2016).

Outro ponto relevante é a resistência ao impacto e à fadiga proporcionada pelo uso de fibras de aço. Essa melhoria é atribuída à sua capacidade de redistribuir tensões localizadas e de absorver energia através da ponte de trinca, o que é essencial em aplicações como pisos industriais, túneis, pavimentos e estruturas pré-moldadas. Ensaio experimentais comprovam que concretos reforçados com fibras de aço exibem aumentos consideráveis de resistência ao impacto em comparação ao concreto convencional (JOHNSON, 2007).

Por fim, a aderência entre a fibra de aço e a matriz cimentícia é fator determinante para o desempenho mecânico. Essa aderência pode ser aprimorada através do uso de fibras com formatos específicos, como ganchos nas extremidades, superfícies onduladas ou entalhes, que aumentam a resistência à extração e a eficiência na transferência de cargas. A geometria, a proporção volumétrica e a orientação das fibras influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do concreto reforçado, sendo, portanto, variáveis de projeto fundamentais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.3.3 Influência nas propriedades do Concreto

As fibras de aço também influenciam positivamente a resistência à fissuração por retração plástica e por retração térmica, especialmente em estágios iniciais de cura. Elas limitam o alargamento das fissuras formadas pela perda de água ou variações de temperatura, mantendo a coesão da estrutura. Essa propriedade é particularmente vantajosa em elementos com grande área superficial exposta ou em ambientes com alta evaporação, onde o concreto convencional apresentaria elevado risco de fissuração precoce (BANTHIA; GUPTA, 2004).

Em relação à durabilidade, o concreto com fibras de aço tende a apresentar maior resistência à penetração de agentes agressivos, como cloretos e sulfatos, desde que seja garantida uma adequada compacidade e cobrimento das fibras. Apesar de as fibras não tornarem o concreto impermeável, elas dificultam o avanço de trincas e contribuem para a manutenção da integridade estrutural, retardando o início da degradação por corrosão de armaduras (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Por fim, é importante destacar que as fibras de aço não substituem as armaduras convencionais, mas atuam de forma complementar, especialmente em aplicações estruturais específicas. Quando bem dosadas e distribuídas, contribuem para reduzir o uso de telas de controle de fissuras, melhorar o desempenho em juntas de pavimentos e possibilitar soluções

mais econômicas em estruturas de concreto projetado ou pré-moldado (ACI COMMITTEE 544, 2009).

3.4 Trabalhabilidade, Resistência e Durabilidade

A introdução de fibras na matriz cimentícia altera significativamente diversas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Dentre essas propriedades, destacam-se a trabalhabilidade, a resistência à compressão, tração e flexão, a durabilidade e a capacidade de absorção de energia. A magnitude dessas alterações está diretamente relacionada ao tipo, formato, conteúdo volumétrico e distribuição das fibras na mistura (ISAIA, 2010b).

A trabalhabilidade do concreto com fibras tende a ser reduzida em função da presença física das fibras, que dificultam o escoamento da mistura. Essa perda de fluidez pode ser compensada pelo uso de aditivos superplastificantes, que promovem a dispersão uniforme das partículas e reduzem o atrito entre os componentes. Além disso, a geometria da fibra exerce influência significativa sobre a reologia da mistura, sendo que fibras longas ou em alta dosagem tendem a prejudicar mais a fluidez (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No que se refere à resistência à compressão, os efeitos da adição de fibras variam conforme o tipo utilizado. Em geral, as fibras não promovem aumento significativo da resistência à compressão, podendo inclusive provocar leve redução se mal distribuídas. No entanto, observam-se benefícios importantes na integridade pós-fissuração e na absorção de energia, o que torna o material mais resistente à propagação de fissuras após o pico de carga (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2012).

A resistência à tração, tanto direta quanto por compressão diametral, é uma das propriedades mais beneficiadas pela incorporação de fibras. As fibras agem como pontes entre as fissuras, restringindo sua abertura e redistribuindo as tensões de tração de forma mais eficiente. Esse comportamento resulta em um concreto mais resistente e seguro em situações críticas, como impactos, vibrações e solicitações repetidas. Ensaio de tração indireta mostram ganhos significativos, especialmente com fibras metálicas (FIGUEIREDO, 2011).

Quanto à durabilidade, o concreto com fibras apresenta desempenho superior em ambientes agressivos, devido à capacidade de limitar a largura e o espaçamento das fissuras. A redução da permeabilidade impede a penetração de agentes deletérios, como água, cloretos e dióxido de carbono, aumentando a vida útil da estrutura. Além disso, fibras resistentes à

corrosão, como poliméricas e de vidro tratadas, são ideais para ambientes marinhos ou industriais, ampliando a gama de aplicações com exigências de alta durabilidade (HELENE; TERZIAN, 2007).

3.4.1 Efeitos das Fibras em testes padrão (*Slump*, Compressão, Tração e Flexão)

A inclusão de fibras no concreto influencia diretamente os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais padrão. Ensaios como o de abatimento (*slump*), compressão axial, tração diametral e flexão são tradicionalmente utilizados para caracterizar o desempenho do concreto, e seus resultados podem sofrer variações consideráveis em função do tipo, da quantidade e da geometria das fibras utilizadas (ISAIA, 2010b).

O ensaio de abatimento (*slump*) é utilizado para avaliar a consistência do concreto no estado fresco. A presença de fibras, principalmente em teores mais elevados, tende a reduzir o abatimento, pois dificulta o escoamento da mistura e a orientação dos agregados. Essa redução da fluidez exige o uso de aditivos plastificantes ou ajustes na relação água/cimento para manter a trabalhabilidade dentro dos padrões aceitáveis. É importante considerar que o *slump* reduzido não necessariamente implica perda de desempenho estrutural, mas pode afetar a moldagem e o adensamento do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No ensaio de compressão axial, observa-se que a adição de fibras raramente resulta em aumentos expressivos na resistência à compressão. Entretanto, as fibras têm papel fundamental na contenção da propagação das fissuras após o pico de carga, promovendo maior integridade estrutural e retardando o colapso da amostra. Essa característica confere ao concreto com fibras um comportamento mais dúctil, o que é particularmente desejável em estruturas sujeitas a solicitações dinâmicas ou em zonas sísmicas (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2012).

Os ensaios de tração por compressão diametral evidenciam com mais clareza os benefícios das fibras. A presença de fibras aumenta significativamente a resistência à tração indireta, pois elas absorvem parte das tensões transversais e atuam como travas entre as fissuras. A energia de ruptura é consideravelmente maior no CRF do que no concreto convencional, demonstrando a maior tenacidade do material e sua capacidade de suportar deformações após a fissuração inicial (FIGUEIREDO, 2011).

Nos ensaios de flexão, os ganhos são ainda mais expressivos. As fibras conferem ao concreto a capacidade de manter resistência residual mesmo após a fissura inicial, fenômeno

conhecido como resistência pós-fissuração. Esse comportamento é avaliado por meio da curva carga-deflexão, onde se observa que o CRF continua suportando cargas relevantes após o limite elástico. Essa propriedade é essencial para pavimentos industriais, placas estruturais e elementos submetidos a cargas concentradas, onde a redistribuição de esforços e a ductilidade são cruciais (HELENE; TERZIAN, 2007).

3.4.2 Estudo de casos anteriores

Diversos estudos de caso documentam os benefícios práticos do uso do concreto reforçado com fibras em obras reais, evidenciando seu desempenho superior frente ao concreto convencional. No Brasil, um dos exemplos mais notáveis foi o emprego de concreto com fibras de aço em túneis do Metrô de São Paulo. Nessa aplicação, as fibras substituíram parcialmente as armaduras convencionais no revestimento primário, resultando em significativa economia de tempo e custos, além de aumentar a segurança durante o processo construtivo (HELENE; TERZIAN, 2007).

Outro estudo relevante envolveu a construção de pisos industriais em centros logísticos de grande porte, como galpões de estocagem em Minas Gerais e São Paulo. Nestes casos, o uso de CRF proporcionou alta resistência ao impacto de empilhadeiras e cargas dinâmicas, evitando fissuras prematuras e reduzindo a necessidade de manutenção. A análise técnica posterior demonstrou que os pisos com fibras apresentaram desempenho até 40% superior em relação aos convencionais quanto à resistência à fadiga e durabilidade (FIGUEIREDO, 2011).

No setor de pré-moldados, um caso significativo foi a utilização de fibras poliméricas em blocos estruturais e painéis de fachada em empreendimentos residenciais no Nordeste. A presença das fibras garantiu maior coesão e resistência ao manuseio durante o transporte e a instalação, evitando trincas decorrentes de impactos. A uniformidade obtida nas peças contribuiu para uma montagem mais rápida e eficiente, demonstrando as vantagens da adoção da tecnologia em larga escala (ISAIA, 2010b).

Ainda no Brasil, foi relatado o uso de concreto com fibras naturais tratadas em projetos de habitação de interesse social na região Norte. Nessas obras, a combinação de fibras de sisal com concreto de baixa resistência permitiu a execução de elementos não estruturais com bom desempenho mecânico e ambientalmente sustentáveis. A escolha por fibras naturais foi motivada por sua disponibilidade local e baixo custo, demonstrando o potencial de soluções

tecnológicas de baixo impacto ambiental em contextos socioeconômicos desafiadores (YAZDANI; GHAVAMI, 2008).

Em escala internacional, destacam-se aplicações em túneis ferroviários na Europa, como o Tunnel de Saverne, na França, e obras subterrâneas no metrô de Barcelona. Nesses projetos, o CRF foi decisivo para garantir segurança estrutural e produtividade no avanço da escavação. As fibras metálicas foram utilizadas com sucesso na projeção automatizada de concreto, reduzindo a espessura do revestimento e aumentando a aderência ao maciço rochoso. Tais casos reforçam a confiabilidade técnica e a viabilidade econômica do CRF em obras de infraestrutura de alta complexidade (BENTUR; MINDESS, 2007).

3.5 Aplicação de Concreto com Fibras na Construção Civil

O concreto reforçado com fibras tem se destacado como uma solução de engenharia versátil, com aplicações crescentes em diferentes segmentos da construção civil. As propriedades aprimoradas conferidas pelas fibras tornam o CRF uma alternativa competitiva ao concreto convencional, especialmente em estruturas que exigem maior controle de fissuração, resistência a impactos, ciclos de carga repetida e durabilidade estendida (ISAIA, 2010b).

Uma das aplicações mais relevantes é em pisos industriais, onde o CRF proporciona maior resistência ao impacto, abrasão e fadiga, reduzindo a ocorrência de fissuras e aumentando a vida útil do pavimento. Com a incorporação de fibras, é possível diminuir ou até eliminar a necessidade de armaduras convencionais, o que resulta em economia de material e tempo de execução. Além disso, o uso do CRF favorece uma redistribuição mais eficiente dos esforços, tornando os pisos mais confiáveis em operações logísticas intensas (HELENE; TERZIAN, 2007).

No segmento de obras subterrâneas, como túneis e estações de metrô, o concreto projetado com fibras tem substituído armaduras convencionais em diversos países. As fibras promovem um aumento significativo na tenacidade e resistência pós-fissuração, garantindo a estabilidade do maciço escavado mesmo após a fissuração do revestimento primário. Essa solução foi amplamente empregada nas linhas do metrô de São Paulo, com ótimos resultados em termos de segurança, desempenho e economia (FIGUEIREDO, 2011).

O CRF também é utilizado em elementos pré-moldados, como painéis, vigas, blocos e reservatórios. Nessas estruturas, as fibras contribuem para a redução de fissuras induzidas por

retração, transporte e montagem. A inclusão de fibras permite a produção de peças mais leves e resistentes, reduzindo a espessura dos elementos e facilitando sua logística. Além disso, o uso de fibras em peças pré-fabricadas garante uma resposta mais confiável às solicitações dinâmicas durante o transporte e instalação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em obras hidráulicas e marítimas, o uso de fibras no concreto melhora significativamente a resistência à erosão, ao desgaste por abrasão e à penetração de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos. Canais, barragens, comportas e galerias técnicas têm se beneficiado da maior durabilidade e estanqueidade proporcionadas pelas fibras. Em regiões costeiras ou sujeitas a ciclos de molhagem e secagem, o CRF representa uma solução eficiente para aumentar a longevidade das estruturas expostas (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2012).

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa visa uma abordagem experimental, tendo como objetivo principal avaliar a influência da incorporação de macrofibras de aço ao concreto sobre suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido. Para esse propósito, foram elaborados seis traços de concreto, sendo um traço de referência convencional, sem adição de fibras, e cinco traços com diferentes teores de macrofibras de aço, correspondentes a 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2% e 3% em volume, em relação à matriz cimentícia.

A seleção dos materiais constituintes foi realizada com base em critérios técnicos e normativos, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 12655 (2015). Foram utilizados cimento Portland do tipo CP II - F, agregados miúdos e graúdos com características compatíveis com a ABNT NBR 7211 (2022), água potável para amassamento, aditivo plastificante e macrofibras de aço, com propriedades previamente especificadas pelo fabricante.

A dosagem do concreto foi desenvolvida por meio do método IPT/EPUSP, considerando uma resistência característica à compressão de referência de 25 MPa. Os traços com adição de fibras foram adaptados a partir do traço de referência, mediante a inserção volumétrica parcial dos agregados pela incorporação das fibras metálicas, respeitando-se os princípios de equivalência volumétrica.

No estado fresco, avaliou-se a trabalhabilidade por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), realizado conforme os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR

16889 (2022). Esse ensaio é fundamental para a verificação da influência das fibras na consistência do concreto e na sua viabilidade de aplicação em condições de obra.

No estado endurecido, foram realizados ensaios laboratoriais aos 7, 14 e 28 dias de idade, contemplando:

- Ensaio de resistência à compressão axial, conforme ABNT NBR 5739 (2018);
- Ensaio de resistência à tração por compressão diametral, segundo ABNT NBR 7222 (2011);
- Ensaio de resistência à tração na flexão, conforme ABNT NBR 12142 (2010);
- Ensaio do módulo de elasticidade estático, de acordo com a ABNT NBR 8522 (2017).

Os corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm × 20 cm e prismáticos, com dimensões de 15 cm × 15 cm × 50 cm, foram moldados e submetidos à cura em ambiente controlado, em conformidade com a ABNT NBR 5738 (2015).

A análise comparativa entre os diferentes teores de macrofibras de aço e o traço convencional foi conduzida com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados, permitindo avaliar o impacto da presença das fibras tanto nas propriedades mecânicas quanto na trabalhabilidade do concreto.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais empregados na produção dos concretos foram selecionados de modo a garantir desempenho adequado, controle tecnológico e reprodutibilidade experimental, atendendo rigorosamente às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

5.1 Caracterização dos Materiais

O cimento Portland foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas e mecânicas, conforme os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis, assegurando conformidade com os requisitos mínimos de desempenho exigidos para concretos estruturais.

Os agregados grãos e miúdos foram submetidos a ensaios de caracterização física, incluindo análise granulométrica, determinação da massa específica, massa unitária e absorção de água, em conformidade com as prescrições normativas vigentes ABNT. Esses ensaios permitiram verificar a compatibilidade granulométrica e a qualidade dos agregados para a

produção do concreto, bem como fornecer subsídios para o controle da dosagem e da relação água/cimento.

A realização prévia desses ensaios de caracterização assegura que todos os materiais empregados atendam aos requisitos técnicos normativos exigidos para concretos estruturais, contribuindo para a reprodutibilidade do estudo, o rigor científico e a confiabilidade dos resultados experimentais.

5.1.1 Ensaios de caracterização da areia

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a ABNT NBR 7217 (2023) – Agregados – Determinação da composição granulométrica, permitindo avaliar a distribuição dos tamanhos das partículas através de peneiramento e na geração da curva granulométrica, assim, analisando a continuidade granulométrica e sua influência na trabalhabilidade e no empacotamento do concreto.

A massa específica da areia foi determinada conforme a ABNT NBR 9776 (1987) – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos, parâmetro essencial para o controle da dosagem e do volume absoluto dos materiais. Apresenta a relação entre a massa do agregado seco e o volume efetivamente ocupado por suas partículas sólidas, desconsiderando os vazios intergranulares.

A massa unitária foi determinada segundo a ABNT NBR NM 45 (2006), que estabelece o procedimento para a avaliação do comportamento volumétrico e do empacotamento das partículas, parâmetros fundamentais para a dosagem e desempenho do concreto, fornecendo informações sobre o comportamento volumétrico do agregado.

O teor de materiais pulverulentos foi avaliado conforme a ABNT NBR 7219 (2014), permitindo a avaliação da influência das partículas e garantindo limites compatíveis com concretos estruturais.

Tabela 5 – Características da areia (agregado miúdo).

Parâmetro	Símbolo / Unidade	Valor
Massa unitária	γ (g/cm ³)	1,41
Massa específica	ρ (g/cm ³)	2,63
Material fino	%	10,25
Teor de umidade	%	6,2
Coefficiente de inchamento crítico	CI_crítico (—)	1,46
Coefficiente de inchamento médio	CI_médio (—)	1,45
Umidade crítica	w_crítica (%)	3,9
Dimensão máxima característica	DMC (mm)	2,4
Módulo de finura	MF (—)	1,96
Classificação	—	Areia média

Fonte: Autor (2025).

5.1.2 Ensaios de caracterização da brita

A análise granulométrica foi realizada conforme a ABNT NBR 7217 (2023), possibilitando a avaliação da distribuição de partículas, assegurando compatibilidade com o agregado miúdo e do empacotamento do agregado. Idem, ao agregado miúdo (caracterização da areia).

A massa específica, massa específica aparente e a absorção de água foram determinadas segundo a ABNT NBR NM 52 (2009), permitindo avaliar porosidade, influência na relação água/cimento efetiva e no empacotamento dos grãos.

Tabela 6 – Características da brita (agregado graúdo).

Parâmetro	Símbolo / Unidade	Valor
Massa unitária	γ (g/cm ³)	1,51
Massa unitária – estado compactado	γ_{comp} (g/cm ³)	1,65
Massa específica seca	ρ_{seca} (g/cm ³)	2,68
Massa específica saturada	ρ_{sat} (g/cm ³)	2,70
Índice de absorção	A (%)	0,8
Material fino	%	1,09
Dimensão máxima característica	DMC (mm)	12,5
Módulo de finura	MF (—)	5,38
Classificação	—	Sem classificação comercial

Fonte: Autor (2025).

5.1.3 Caracterização do cimento

O cimento utilizado foi do Grupo Votorantim marca Tocantins especificação CP II – F – 32, Cimento Portland composto por aproximadamente 6 a 10% de teor de fíler (calcário). Resistência mínima alcançada aos 28 dias de 32 Mpa, secagem mais rápida, boa trabalhabilidade e menor desprendimento de calor, sendo ideal para argamassas, concreto armado/usinado, pisos e pavimentos, e elementos pré-moldados, atendendo à norma NBR 11578.

Figura 8 – CP II-F 32, utilizado.



Fonte: Votorantim Cimentos (2025).

A ABNT NBR 16605 (2017) estabelece o método para a determinação da massa específica do cimento Portland, parâmetro físico essencial para a caracterização do material e para a correta dosagem de concretos e argamassas.

O tempo de pega foi avaliado conforme a ABNT NBR 16607 (2018), assegurando compatibilidade com os procedimentos de moldagem.

Tabela 7 – Propriedades e características do cimento CP II-F 32.

Produto	Tipo de cimento	Cimento Portland Composto – CP II-F 32
Marca	Marca comercial	Tocantins
Fabricante	Grupo industrial	Votorantim Cimentos
Norma	Classificação normativa	ABNT NBR 16697
Aditivo	Tipo de adição	Fíler calcário (material carbonático)
Classe resistente	Classe de resistência	32 MPa
Aplicação	Uso recomendado	Concreto convencional, argamassas, rebocos, contrapisos e lajes
Desempenho	Características principais	Versatilidade, boa trabalhabilidade e resistência adequada
Embalagem	Pesos comerciais	25 kg, 42,5 kg e 50 kg (conforme região)
Cor	Aspecto visual	Cinza
Armazenamento	Condições recomendadas	Local seco, coberto e ventilado
Validade	Prazo típico	Conforme condições de armazenamento do fabricante
Segurança	Manuseio	Uso de EPI conforme FISPQ do fabricante
Teor de Água*	A	29,8%
Massa Específica*	ρ	3 g/cm ³
Início de Pega*	Tempo	1h:38min
Fim de Pega*	Tempo	5h:03min

* Ensaio realizado em laboratório pelo autor.

Fonte: Autor (2025).

5.1.4 Caracterização das fibras de aço

As propriedades das fibras foram fornecidas pelo fabricante e estão expostas na Tabela 8, a Figura 9 apresentam o aspecto visual das fibras utilizadas na pesquisa.

Tabela 8 – Parâmetros da macrofibra utilizada.

Parâmetro	Descrição	Valor / Situação
Produto	Nome do produto	Fibra de aço corrugada
Marca	Fabricante	Fibramax
Lote	Identificação	277
Norma	Norma técnica	ABNT NBR 15530:2019
Tipo	Classificação	Tipo III
Classe	Classe do produto	C
Fator de forma	FF	40
Comprimento nominal	L (mm)	40
Resistência à tração	ft (MPa)	≥ 800
Teste de dobramento	Controle de qualidade	Aprovado
Defeitos	Inspeção visual	Aprovado
Dimensional	Verificação dimensional	Aprovado
Modelo	Identificação comercial	MTC 40/40
Diâmetro	D (mm)	$0,7 \pm 0,25$
Largura	A (mm)	$2,0 \pm 0,5$
Passo	P (mm)	$7,0 \pm 1,0$
Comprimento	C (mm)	40 ± 3
Fibras por kg	Quantidade aproximada	≈ 4.620

Fonte: Matcon (2025).

Figura 9 – Aspecto visual macrofibras de aço.



Fonte: Autor (2025).

5.1.5 Caracterização do aditivo

O Aditivo utilizado foi o VEDACIT ADITIVO PLASTIFICANTE permitindo a redução de água do concreto. Assim, além de aumentar as resistências mecânicas, proporcionam concretos homogêneos, coesos e com menor permeabilidade. Sua aparência é marrom escura, sua composição básica de lignosulfonatos, com densidade de $1,22 \text{ g/cm}^3$ e validade de 12 meses.

Figura 10 – Aditivo plastificante utilizado.



Fonte: VEDACIT (2025).

5.2 Definição dos traços de concreto com e sem fibras

Inicialmente, foi definido um traço de referência, correspondente ao concreto convencional, sem adição de fibras, dosado de modo a atender à resistência característica à compressão especificada inicialmente. O traço em massa definido foi de: 1 : 1,43 : 2,07 : 0,45 e 1,5% de aditivo em relação a massa de cimento.

A partir do traço de referência, foram definidos os traços de concreto reforçado com fibras de aço, mantendo-se constantes os principais parâmetros de dosagem, como tipo de cimento, relação água/cimento e composição dos agregados. A incorporação das fibras foi realizada por inserção volumétrica parcial dos agregados, respeitando o princípio da equivalência volumétrica.

A trabalhabilidade dos concretos com fibras foi ajustada, quando necessário, por meio da dosagem de aditivo plastificante, evitando alterações na relação água/cimento.

Tabela 9 – Resumo dos traços de concreto utilizados na pesquisa.

Traço	Tipo de concreto	Teor de fibras de aço	Observações
T1	Concreto convencional	0,0%	Traço de referência
T2	Concreto com fibras	0,5%	Teor em relação a massa de cimento
T3	Concreto com fibras	1,0%	Teor em relação a massa de cimento
T4	Concreto com fibras	1,5%	Teor em relação a massa de cimento
T5	Concreto com fibras	2,0%	Teor em relação a massa de cimento
T6	Concreto com fibras	3,0%	Teor em relação a massa de cimento

Fonte: Autor (2025).

O procedimento adotado assegura a reprodutibilidade dos traços, o controle das variáveis experimentais e a confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo a análise isolada da influência da incorporação das fibras de aço no desempenho do concreto.

5.3 Procedimento de produção do concreto

A mistura dos materiais foi realizada em betoneira de eixo inclinado, obedecendo à seguinte sequência: adição dos agregados graúdos e miúdos, incorporação do cimento Portland, introdução parcial da água de amassamento, adição do aditivo plastificante previamente diluído na água restante e, por fim, inserção gradual das fibras de aço. O tempo de mistura foi controlado de modo a garantir distribuição homogênea dos materiais e evitar a formação de aglomerados.

Após a mistura, o concreto foi moldado em corpos de prova cilíndricos e prismáticos, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5738 (2015). O adensamento foi realizado de maneira adequada, por meio de um aparelho vibrador com mangote e ponta metálica em conformidade com a ABNT NBR 14931 (2023), visando eliminar vazios excessivos e assegurar a uniformidade dos corpos de prova. A cura foi realizada por imersão em tanque de água, permanecendo até o dia dos ensaios.

5.4 Ensaios laboratoriais realizados

Os ensaios laboratoriais realizados nesta pesquisa tiveram como objetivo avaliar o comportamento do concreto no estado fresco e no estado endurecido, bem como analisar a influência da incorporação de fibras de aço nas propriedades físicas e mecânicas do material. Todos os ensaios foram conduzidos em conformidade com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), assegurando padronização dos procedimentos, rigor científico e reprodutibilidade experimental.

Os ensaios realizados estão elencados:

- **Ensaio de abatimento (*Slump Test*)**

A ABNT NBR 16889 (2022) estabelece o método para a determinação da consistência do concreto no estado fresco, por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conhecido internacionalmente como *slump test*. Esse ensaio é amplamente utilizado no controle tecnológico do concreto por permitir uma avaliação rápida e padronizada da trabalhabilidade da mistura.

Em concretos reforçados com fibras, o ensaio é especialmente relevante, pois a presença das fibras pode reduzir a fluidez da mistura, exigindo ajustes de dosagem para garantir trabalhabilidade adequada.

- **Resistência à compressão (NBR 5739)**

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado com o objetivo de determinar a capacidade resistente do concreto sob esforços de compressão, propriedade fundamental para o desempenho estrutural. O procedimento experimental seguiu rigorosamente as prescrições da ABNT NBR 5739 (2018).

Em concretos reforçados com fibras de aço, embora a resistência à compressão não seja significativamente alterada em muitos casos, o ensaio continua sendo essencial para verificar a conformidade do material com os requisitos de projeto e para comparação com o concreto convencional de referência.

- **Resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222)**

A ABNT NBR 7222 (2011) estabelece o método para a determinação da resistência à tração do concreto por meio do ensaio de compressão diametral, também conhecido como ensaio brasileiro Lobo Carneiro. Esse ensaio é amplamente utilizado para avaliar o

comportamento do concreto sob esforços de tração indireta, uma vez que o material apresenta resistência significativamente menor à tração do que à compressão.

Em concretos reforçados com fibras de aço, esse ensaio é particularmente relevante, pois permite analisar a contribuição das fibras no controle da abertura de fissuras e no aumento da capacidade resistente à tração.

- **Resistência à tração na flexão (NBR 12142)**

A ABNT NBR 12142 (2010) estabelece o método para a determinação da resistência à tração na flexão do concreto, por meio do ensaio de corpos de prova prismáticos submetidos a carregamento até a ruptura. Esse ensaio avalia o comportamento do concreto quando solicitado por esforços de flexão, situação típica em elementos como lajes, pavimentos, vigas de pequena altura e peças delgadas.

Em concretos reforçados com fibras de aço, esse ensaio é amplamente utilizado para analisar a contribuição das fibras no controle da fissuração, na redistribuição de tensões e no aumento da ductilidade, sendo mais sensível a esses efeitos do que o ensaio de compressão axial.

- **Módulo de Elasticidade (NBR 8522)**

A ABNT NBR 8522 (2017) estabelece o método para a determinação do módulo de elasticidade estático do concreto à compressão, parâmetro mecânico fundamental para a análise do comportamento deformacional do material quando submetido a esforços compressivos. O módulo de elasticidade representa a relação entre a tensão aplicada e a deformação correspondente no regime elástico, sendo um indicador direto da rigidez do concreto.

Em estudos experimentais envolvendo concretos modificados, como concretos reforçados com fibras de aço, esse ensaio permite avaliar a influência da incorporação de fibras na rigidez do material e no seu comportamento deformacional.

Figura 11 - Apresenta os respectivos ensaios realizados.



Fonte: Autor (2025).

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados nos concretos com e sem adição de macrofibras de aço, são apresentados contemplando o comportamento do material no estado fresco e no estado endurecido. A análise tem como base a comparação entre o traço de referência, sem fibras, e os traços reforçados com diferentes teores de macrofibras, permitindo avaliar a influência da incorporação das fibras sobre as propriedades do concreto.

Os resultados experimentais foram organizados de forma a evidenciar as variações provocadas pelo aumento do teor de fibras, considerando parâmetros como consistência e

trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.

- **Consistência e trabalhabilidade**

A consistência e a trabalhabilidade dos concretos, foram avaliadas por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone.

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar a influência da adição de fibras de aço na trabalhabilidade dos traços, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados dos *slump test* e a adição do teor de aditivos para cada traço (T1 a T6).

Traços	<i>Slump</i> com 1,5% de aditivo	<i>Slump</i> com 2,1% de aditivo	<i>Slump</i> com 2,7% de aditivo
T1	165 mm	-	-
T2	56 mm	148 mm	-
T3	50 mm	139 mm	-
T4	48 mm	110 mm	-
T5	12 mm	60 mm	-
T6	5 mm	24 mm	42 mm

Fonte: Autor (2025).

Essas alterações no comportamento do concreto fresco impactam diretamente sua viabilidade de aplicação em obra, exigindo, em alguns casos, ajustes no traço ou no método de adensamento para garantir adequada moldagem e acabamento, sem prejuízo às propriedades finais do material.

A análise dos resultados obtidos no ensaio de abatimento do tronco de cone evidenciou de forma clara a influência da incorporação de fibras de aço na consistência e na trabalhabilidade dos concretos estudados. Notou-se que o aumento do teor de fibras promoveu uma redução significativa do abatimento, comportamento associado ao maior intertravamento interno da mistura e ao aumento da resistência ao escoamento do concreto no estado fresco.

Os resultados apresentados demonstram que para teores crescentes de fibras, a trabalhabilidade foi progressivamente reduzida, exigindo o aumento do teor de aditivo plastificante como estratégia para manter níveis mínimos de fluidez. Entretanto, mesmo com o incremento do aditivo, os traços com maiores teores de fibras, especialmente 2,0% e 3,0%,

apresentaram valores de *slump* consideravelmente baixos, indicando limitações práticas de moldagem e adensamento.

Esse comportamento pode ser explicado pela atuação das fibras como elementos rígidos dispersos na matriz cimentícia, que dificultam o rearranjo das partículas sólidas e aumentam o atrito interno da mistura. Em teores elevados, essa condição favorece a formação de zonas de concentração de fibras e a incorporação de vazios, comprometendo a homogeneidade do concreto fresco.

Figura 12 – Ensaio de abatimento do concreto (T1 a T6).



Fonte: Autor (2025).

● Resistência à compressão

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão nas idades de análise. A análise dos resultados permitiu avaliar a influência dos diferentes teores de fibras de aço no desempenho mecânico do concreto.

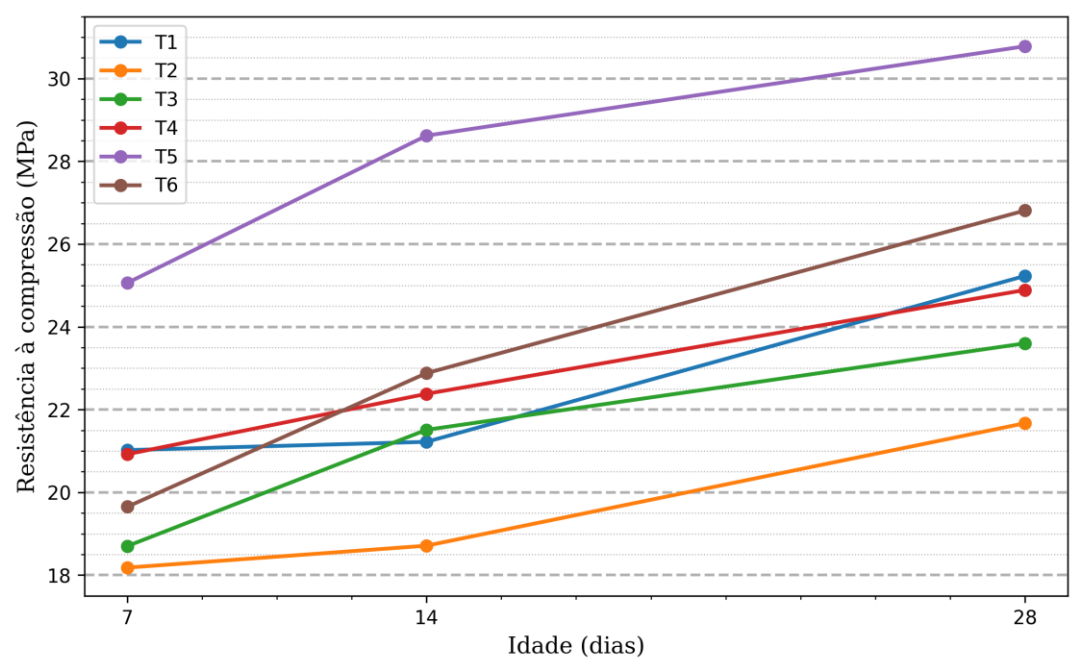
De modo geral, observou-se que a presença das fibras contribui para a melhoria do comportamento pós-fissuração e para o aumento da capacidade de absorção de energia, embora seus efeitos diretos sobre a resistência à compressão possam variar em função da dosagem, da dispersão das fibras e da qualidade da matriz cimentícia.

Tabela 11 – Resultados do ensaio à compressão.

Compressão			
Traço	7 dias (MPa)	14 dias (MPa)	28 dias (MPa)
T1	21,02	21,22	25,23
T2	18,18	18,71	21,67
T3	18,70	21,51	23,60
T4	20,92	22,38	24,89
T5	25,06	28,62	30,78
T6	19,65	22,88	26,81

Fonte: Autor (2025).

Figura 13 – Ensaio resistência à compressão.



Fonte: Autor (2025).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 11 e na figura 13 acima correspondente, observa-se que todos os traços analisados apresentaram incremento da resistência à compressão com o aumento da idade de cura, comportamento esperado em função da progressiva hidratação do cimento e do consequente adensamento da matriz cimentícia.

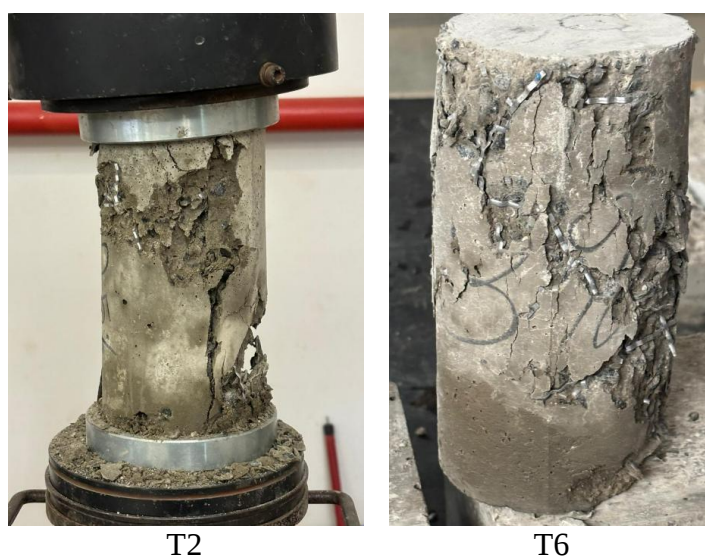
O T1 apresentou resistências de 21,02 MPa, 21,22 MPa e 25,23 MPa aos 7, 14 e 28 dias, respectivamente, servindo como referência para a avaliação do efeito da incorporação de fibras de aço. Nos traços reforçados, verificou-se que os teores de T2 (0,5%) e T3 (1,0%) resultaram em resistências inferiores ao concreto convencional nas idades iniciais, indicando que, para baixos teores de fibras, os efeitos negativos associados à redução da trabalhabilidade e à possível formação de vazios podem se sobrepor aos benefícios mecânicos esperados.

Por outro lado, o traço T4 com 1,5% de fibras apresentou desempenho próximo ao concreto convencional, com tendência de recuperação da resistência ao longo do tempo. O melhor desempenho mecânico foi observado no traço T5 com 2,0% de fibras, que apresentou resistências de 25,06 MPa, 28,62 MPa e 30,78 MPa aos 7, 14 e 28 dias, respectivamente, superando significativamente o traço de referência, especialmente na idade de 28 dias.

O aumento da resistência nesse teor pode ser atribuído à atuação eficiente das fibras de aço no controle da microfissuração, promovendo melhor redistribuição das tensões internas e retardando a propagação das fissuras sob carregamento compressivo. Entretanto, para o traço T6 com 3,0% de fibras, embora os valores de resistência ainda sejam superiores aos dos traços com menores teores, observa-se uma redução em relação ao traço T5 com 2,0%, indicando a existência de um teor ótimo de fibras.

Esse comportamento pode estar relacionado a dificuldades de dispersão das fibras na matriz cimentícia em teores elevados, bem como à redução da trabalhabilidade do concreto, favorecendo a incorporação de vazios e descontinuidades internas. Dessa forma, os resultados evidenciam que a adição de fibras de aço influencia a resistência à compressão do concreto de maneira não linear, sendo fortemente dependente da dosagem adotada e da qualidade da matriz cimentícia.

Figura 14 – Corpos de prova pós ruptura (T2 e T6).



Fonte: Autor (2025).

- **Resistência à tração por compressão diametral**

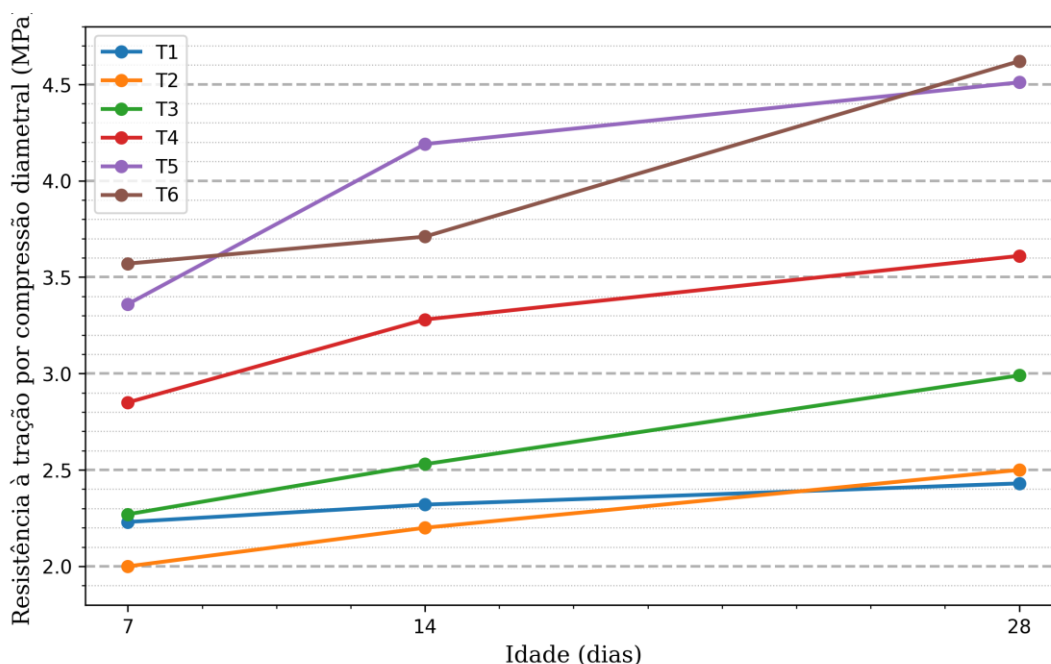
Os resultados obtidos possibilitaram comparar o desempenho dos diferentes traços, evidenciando a influência do teor de fibras na redistribuição de tensões e na capacidade de absorção de energia do concreto. A Tabela 12 apresenta os resultados da resistência à tração por compressão diametral nas idades analisadas.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração por
Compressão diametral.

Tração por compressão diametral			
Traço	7 dias (MPa)	14 dias (MPa)	28 dias (MPa)
T1	2,23	2,32	2,43
T2	2,00	2,20	2,50
T3	2,27	2,53	2,99
T4	2,85	3,28	3,61
T5	3,36	4,19	4,51
T6	3,57	3,71	4,62

Fonte: Autor (2025).

Figura 15 – Resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral evidenciam, de forma clara, a influência do teor de fibras de aço no comportamento mecânico do concreto sob esforços de tração indireta. Observa-se que, para todas as idades analisadas (7, 14 e 28 dias), o aumento do teor de fibras resulta em acréscimos progressivos da resistência à tração diametral, indicando a efetividade das fibras no controle da fissuração da matriz cimentícia.

O concreto sem fibras T1 apresentou os menores valores de resistência à tração diametral em todas as idades, com crescimento moderado ao longo do tempo de cura, comportamento característico de concretos convencionais, nos quais a resistência à tração está fortemente vinculada à coesão da pasta e à aderência pasta-agregado. Esse desempenho evidencia a limitação do concreto simples em resistir a esforços de tração, sobretudo após o surgimento da fissura inicial.

Com a introdução de fibras de aço, verifica-se uma alteração significativa no mecanismo de ruptura. A partir de teores iguais ou superiores ao T3 (1,0%), os ganhos de resistência tornam-se mais expressivos, especialmente aos 14 e 28 dias. Esse comportamento pode ser atribuído à atuação das fibras como elementos de ponte de transferência de tensões, capazes de

restringir a abertura das fissuras e redistribuir os esforços de tração após a fissuração da matriz, retardando o colapso do material.

Os maiores valores de resistência à tração diametral foram observados nos traços T5 e T6 com 2,0% e 3,0% de fibras, em todas as idades de ensaio. Esse resultado indica que teores elevados de fibras potencializam a capacidade resistente do concreto sob tração indireta, promovendo maior absorção de energia e um comportamento pós-fissuração mais estável. Tal efeito é particularmente relevante para aplicações em que a ductilidade e o controle de fissuras são requisitos fundamentais.

Entretanto, a análise crítica dos resultados sugere que o ganho de resistência não ocorre de maneira linear em função do aumento do teor de fibras. Observa-se que, embora o traço T6 com 3,0% de fibras apresente os maiores valores absolutos de resistência, o incremento em relação ao traço T5 com 2,0% é relativamente menor, especialmente em idades iniciais. Esse comportamento pode estar associado a limitações de dispersão das fibras na matriz, bem como à formação de zonas de concentração de fibras, que reduzem a eficiência do reforço quando se atinge teores muito elevados.

Além disso, a evolução dos resultados ao longo do tempo de cura indica que a contribuição das fibras se torna mais efetiva em idades mais avançadas, quando a matriz cimentícia apresenta maior resistência e capacidade de ancoragem das fibras. Isso reforça a importância da interação fibra–matriz como fator determinante para o desempenho à tração do concreto reforçado.

De modo geral, os resultados confirmam que o ensaio de tração por compressão diametral é sensível à presença de fibras de aço e adequado para avaliar sua contribuição mecânica. A análise evidencia que a adição de fibras melhora substancialmente a resistência à tração indireta do concreto, sobretudo para teores intermediários a elevados, ao mesmo tempo em que destaca a necessidade de um controle criterioso da dosagem para garantir a máxima eficiência do reforço.

Figura 16 – Corpos de prova pós ruptura (T1, T3, T5 E T6).



T1



T3



T5



T6



T1



T3



T5



T6

Fonte: Autor (2025).

● Resistência à tração na flexão

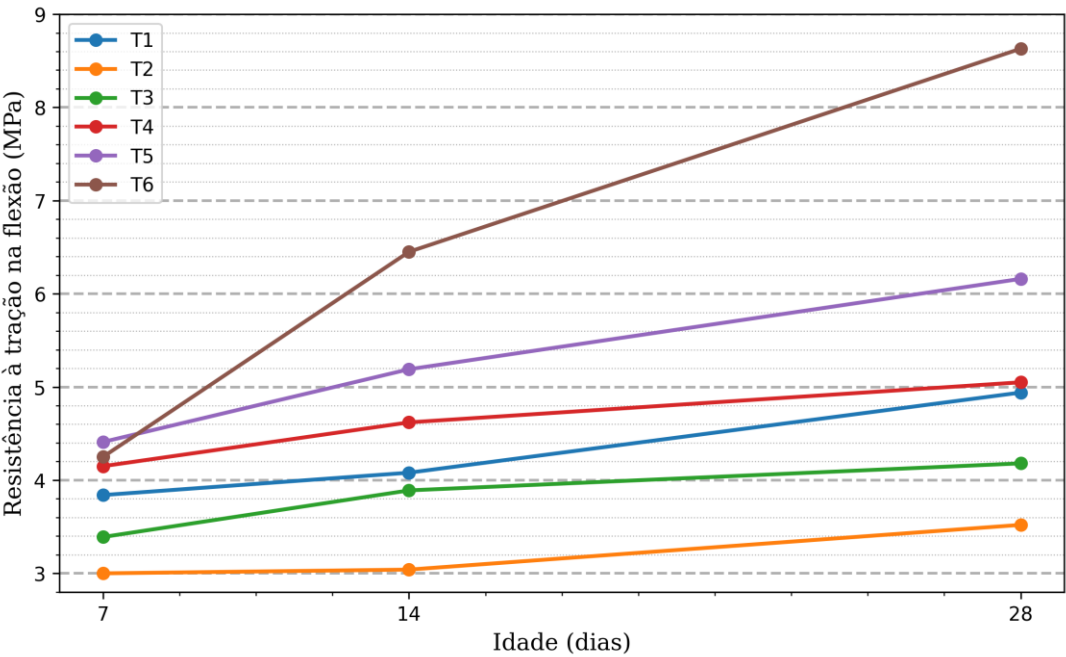
A presença das fibras de aço contribuiu significativamente para o aumento da resistência residual e da capacidade de absorção de energia após o surgimento das fissuras, retardando a propagação das mesmas. A Tabela 13 e a figura 17 apresentam os resultados desse ensaio.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de tração na flexão.

Tração na flexão			
Traço	7 dias (MPa)	14 dias (MPa)	28 dias (MPa)
T1	3,84	4,08	4,94
T2	3,00	3,04	3,52
T3	3,39	3,89	4,18
T4	4,15	4,62	5,05
T5	4,41	5,19	6,16
T6	4,25	6,45	8,63

Fonte: Autor (2025).

Figura 17 – Tração na flexão.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados obtidos evidenciaram a influência dos diferentes teores de fibras de aço no desempenho do concreto sob esforços de tração, bem como na melhoria da ductilidade do material, quando comparado ao concreto convencional.

A análise dos resultados de resistência à tração na flexão evidencia de forma clara a influência do teor de fibras de aço no comportamento mecânico do concreto, tanto em idades iniciais quanto em idades mais avançadas de cura. Observa-se, que a incorporação de fibras promoveu melhorias progressivas na resistência à flexão, especialmente a partir dos teores intermediários, quando comparados ao concreto convencional.

Nos resultados aos 7 dias, verifica-se que os traços com menores teores de fibras (0,5% e 1,0%) apresentaram resistências inferiores ao concreto convencional. Esse comportamento pode ser atribuído, principalmente, à dificuldade de dispersão das fibras na matriz cimentícia em idades iniciais, bem como à possível interferência das fibras na compactação e na aderência inicial pasta-agregado. Entretanto, a partir do teor de 1,5%, observa-se uma recuperação e posterior superação da resistência do concreto convencional, indicando que, a partir desse nível, a contribuição das fibras passa a ser estruturalmente significativa.

Aos 14 dias, o efeito positivo das fibras torna-se mais evidente. Nota-se um crescimento contínuo da resistência à flexão com o aumento do teor de fibras, destacando-se os traços com 2,0% e 3,0%, que apresentaram ganhos expressivos em relação ao concreto sem fibras. Esse comportamento está associado à maior capacidade das fibras em controlar a propagação de fissuras, redistribuir tensões e promover um comportamento mais dúctil após o início da fissuração, especialmente à medida que a matriz cimentícia ganha resistência com a evolução da hidratação.

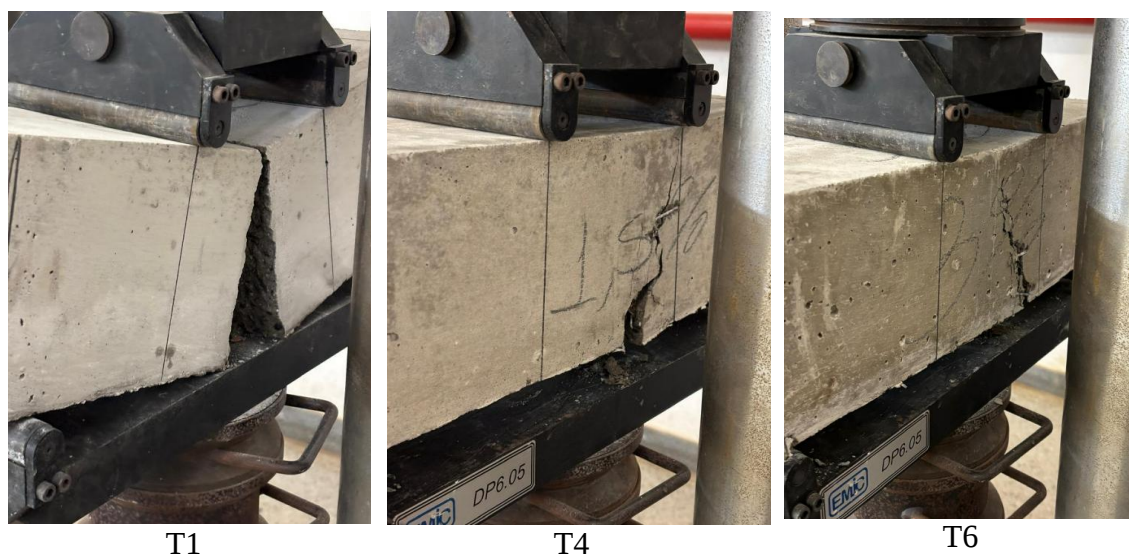
Já aos 28 dias, os resultados confirmam de forma inequívoca a eficácia do reforço com fibras de aço. Observa-se um incremento substancial da resistência à tração na flexão com o aumento do teor de fibras, sendo o traço com 3,0% o que apresentou o melhor desempenho. Esse ganho expressivo indica que, em idades mais avançadas, a interação fibra-matriz torna-se mais eficiente, permitindo que as fibras atuem de forma mais efetiva no mecanismo de ponteamto das fissuras, aumentando a resistência residual e a capacidade de absorção de energia do material.

É importante destacar que, embora teores mais elevados de fibras resultem em maiores resistências à flexão, esses ganhos devem ser analisados de forma criteriosa, considerando possíveis impactos na trabalhabilidade do concreto, no processo de moldagem e nos custos de

produção. Assim, os resultados indicam que existe um teor ótimo de fibras, a partir do qual os benefícios mecânicos são maximizados sem comprometer significativamente as propriedades do concreto fresco.

A Figura 18 apresenta respectivamente corpos de prova do traço de referência e de traços com teores de fibra pós ruptura, enquanto no T1 as partes se dividem e ficam soltas, nos T4 e T5 reforçados com fibras as partes não se soltam completamente, demonstrado a contribuição das fibras após fissuração.

Figura 18 – Corpos de prova pós ruptura (T1, T4 e T6).



Fonte: Autor (2025).

- **Módulo de elasticidade**

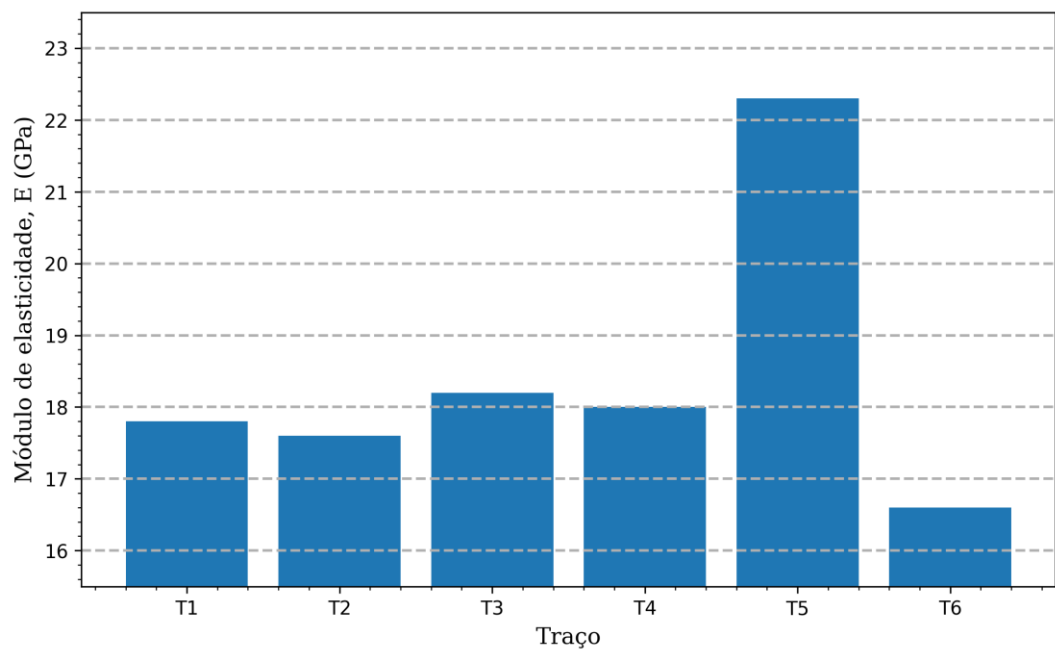
A determinação do módulo de elasticidade possibilita avaliar os efeitos da incorporação de fibras de aço na matriz cimentícia, verificando eventuais alterações na rigidez global do concreto. A Tabela 14 apresenta os resultados.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.

Módulo de elasticidade	
Traço	E (GPa)
T1	17,80
T2	17,60
T3	18,20
T4	18,00
T5	22,30
T6	16,60

Fonte: Autor (2025).

Figura 19 – Módulo de elasticidade.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade evidenciam que a incorporação de fibras de aço exerce influência diferenciada sobre o comportamento elástico do concreto, dependendo do teor adotado. Observa-se que, para os traços com menores percentuais de fibras (0,5%, 1,0% e 1,5%), os valores do módulo de elasticidade permaneceram próximos ao do

concreto convencional, indicando que a adição moderada de fibras não altera de forma significativa a rigidez inicial do material.

O traço com 2,0% de fibras apresentou um aumento expressivo do módulo de elasticidade, sugerindo uma contribuição mais efetiva das fibras na restrição das deformações elásticas. Esse comportamento pode ser associado ao maior intertravamento entre fibras e matriz cimentícia, bem como à melhoria na transferência de tensões, resultando em maior rigidez global do compósito. Tal resultado indica a existência de um teor ótimo de fibras para a maximização do módulo elástico, no qual os benefícios estruturais superam eventuais limitações relacionadas à trabalhabilidade e à homogeneidade da mistura.

Por outro lado, o traço com 3,0% de fibras apresentou redução do módulo de elasticidade em relação aos demais, inclusive quando comparado ao concreto convencional. Esse comportamento pode estar relacionado à dificuldade de dispersão das fibras em teores elevados, favorecendo a formação de aglomerados, o aumento da porosidade e possíveis descontinuidades na matriz cimentícia, fatores que comprometem a rigidez do material. Além disso, o excesso de fibras pode interferir negativamente no processo de adensamento, resultando em uma microestrutura menos eficiente do ponto de vista elástico.

De modo geral, os resultados indicam que o módulo de elasticidade do concreto reforçado com fibras de aço não apresenta relação linear com o teor de fibras incorporado. Enquanto teores intermediários podem promover ganhos na rigidez do material, teores excessivos tendem a gerar efeitos adversos. Assim, a análise do módulo de elasticidade reforça a necessidade de um controle criterioso do teor de fibras, de modo a assegurar um equilíbrio entre rigidez, desempenho mecânico e viabilidade construtiva, especialmente em aplicações estruturais onde as deformações elásticas são determinantes para o comportamento global da estrutura.

6.1 Confronto com a Literatura

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho foram confrontados com estudos publicados na literatura técnica e científica que abordam o comportamento do concreto com adição de fibras de aço, com ênfase nos aspectos experimentais, na resposta mecânica à tração indireta, à tração na flexão e às variações do módulo de elasticidade.

Do ponto de vista experimental, a literatura destaca que o desempenho do concreto reforçado com fibras depende fortemente do teor incorporado, da geometria das fibras, do

método de mistura, da dispersão e da qualidade do adensamento (ACI COMMITTEE 544, 2009; RILEM TC 162-TDF, 2003). No presente trabalho, observou-se que os traços com menores teores de fibras apresentaram, em algumas idades iniciais, comportamento semelhante ou inferior ao concreto convencional, especialmente em propriedades sensíveis à compressão. Tal comportamento é coerente com o descrito pelo ACI 544, que ressalta que a incorporação de fibras pode reduzir a trabalhabilidade e comprometer a eficiência do adensamento, afetando negativamente os ganhos mecânicos esperados quando não há controle rigoroso do processo executivo.

Em relação à tração por compressão diametral, os resultados deste estudo indicaram incrementos progressivos com o aumento do teor de fibras, especialmente aos 28 dias, confirmando a atuação das fibras no controle da fissuração e na redistribuição de tensões. De acordo com o ACI COMMITTEE 544 (2009), os ganhos nesse tipo de ensaio tendem a ser mais moderados quando comparados aos ensaios de flexão, pois dependem fortemente da orientação aleatória das fibras em relação ao plano de ruptura. Essa tendência também foi observada neste trabalho, no qual os aumentos, embora consistentes, foram menos expressivos do que aqueles obtidos nos ensaios de flexão.

A resistência à tração na flexão mostrou-se a propriedade mais sensível à adição de fibras de aço. No presente estudo, observou-se aumento significativo da resistência à flexão com o acréscimo do teor de fibras, sobretudo para teores iguais ou superiores a 1,5%, com destaque para os resultados aos 28 dias. Esse comportamento está em consonância com os resultados experimentais apresentados por QIAN e PATNAIKUNI (1999), que observaram ganhos expressivos na resistência e na capacidade de absorção de energia de elementos submetidos à flexão com o aumento do volume de fibras de aço. Segundo os autores, a principal contribuição das fibras está associada ao mecanismo de ponteamto das fissuras, que retarda sua propagação e confere maior ductilidade ao material, fenômeno igualmente identificado nos resultados deste trabalho.

As recomendações do RILEM TC 162-TDF (2003) reforçam que os ensaios de flexão são particularmente adequados para a caracterização do concreto com fibras, uma vez que permitem avaliar não apenas a resistência máxima, mas também o comportamento pós-fissuração. Nesse sentido, os resultados obtidos neste estudo estão alinhados com a literatura, evidenciando que o concreto reforçado com fibras apresenta desempenho superior ao concreto convencional sob solicitações de tração em flexão.

Quanto ao módulo de elasticidade, os resultados do presente trabalho indicaram comportamento não linear em função do teor de fibras, com aumento em teores intermediários e redução em teores mais elevados. Esse comportamento é compatível com o relatado por ACI COMMITTEE 544 (2009) e discutido por NAAMAN (2003), que destacam que o módulo de elasticidade do concreto com fibras é fortemente influenciado pela matriz cimentícia, pela porosidade e pelas condições de adensamento, não sendo esperado um aumento proporcional e contínuo com a adição de fibras.

O trabalho de FASOLO (2023), desenvolvida na Universidade Federal do Paraná (UFPR), corrobora esses resultados ao indicar que, embora as fibras promovam ganhos significativos no comportamento à flexão e no desempenho pós-fissuração, o módulo de elasticidade não sofre variações expressivas e pode até ser reduzido em situações de elevada heterogeneidade da mistura. Assim, os resultados obtidos neste trabalho mostram-se coerentes com os achados experimentais dessa dissertação, especialmente no que se refere à maior eficiência das fibras em solicitações de tração e flexão.

Comportamento semelhante foi observado por ZHAO et al. (2020), que investigaram concretos reforçados com fibras de aço com extremidades ancoradas (hooked-end steel fibers), classificadas conforme a ASTM A820, em teores volumétricos de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%, mantendo constante o traço de referência.

Os autores utilizaram cimento Portland, agregados naturais e aditivo plastificante, avaliando a resistência à compressão, tração indireta, resistência à flexão e trabalhabilidade. Os resultados demonstraram que os ganhos mecânicos foram mais expressivos até o teor de 2,0%, enquanto teores superiores acarretaram perda significativa de trabalhabilidade e dificuldades de homogeneização, sem incrementos proporcionais de resistência.

Dessa forma, os autores apontaram 2,0% como teor ótimo para o sistema analisado. A concordância entre os resultados de ZHAO et al. (2020) e os obtidos neste estudo reforça que o teor ótimo de fibras de aço está diretamente associado às características do traço, dos materiais empregados e ao tipo de fibra utilizada, não sendo um valor universal.

De modo geral, o confronto com a literatura evidencia que os resultados obtidos neste trabalho estão em consonância com o conhecimento técnico-científico consolidado, confirmando que a principal contribuição das fibras de aço no concreto está associada à melhoria do comportamento à tração, à ductilidade e ao desempenho pós-fissuração, sendo

fundamental o controle do teor de fibras e das condições experimentais para a obtenção de resultados satisfatórios.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões gerais

Com base nos resultados experimentais obtidos neste estudo, foi possível avaliar que há influência da incorporação de macrofibras de aço no comportamento do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A comparação entre o traço de referência e os traços reforçados evidenciou que a adição de fibras promove alterações significativas nas propriedades mecânicas do material, especialmente naquelas associadas aos esforços de tração e ao comportamento pós-fissuração.

De modo geral, observou-se que a presença das fibras de aço contribuiu para a melhoria da ductilidade do concreto, aumentando sua capacidade de absorção de energia e modificando o modo de ruptura, que deixou de ser abrupto e frágil, característico do concreto convencional. Esses efeitos foram mais pronunciados nos ensaios de tração por compressão diametral e de tração na flexão, nos quais os traços com maiores teores de fibras apresentaram desempenhos significativamente superior ao traço de referência.

Em relação à resistência à compressão, verificou-se que a adição de fibras não resultou em incrementos lineares dessa propriedade. O comportamento observado indicou a existência de um teor ótimo de fibras, no qual os benefícios mecânicos superam os efeitos negativos associados à perda de trabalhabilidade e à possível formação de vazios. Nesse contexto, o traço com 2,0% de fibras apresentou o melhor desempenho global, especialmente aos 28 dias de idade.

Os resultados obtidos demonstram que o concreto reforçado com fibras de aço possui elevado potencial para aplicações estruturais em que a ductilidade, o controle da fissuração e o desempenho pós-fissuração são requisitos relevantes, desde que sejam adotados critérios adequados de dosagem e controle tecnológico.

7.2 Desempenho do concreto com fibras estudado

A análise detalhada do desempenho dos concretos com fibras de aço evidenciou que o aumento do teor de fibras impacta de maneira direta e significativa tanto o comportamento no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, observou-se redução progressiva

da trabalhabilidade com o aumento do teor de fibras, atribuída ao maior intertravamento interno da mistura e ao aumento do atrito entre os constituintes, exigindo ajustes na dosagem de aditivo plastificante para viabilizar a moldagem e o adensamento.

No estado endurecido, os concretos reforçados apresentaram ganhos expressivos nas propriedades relacionadas à tração. A resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão aumentaram de forma consistente com o acréscimo do teor de fibras, evidenciando a atuação eficiente das fibras no controle da abertura e propagação das fissuras. Esses resultados confirmam o papel das fibras como elementos de ponte de transferência de tensões, capazes de manter a integridade do material após a fissuração da matriz cimentícia.

Quanto ao módulo de elasticidade, os resultados indicaram que a incorporação de fibras de aço não promoveu aumento proporcional da rigidez do concreto, apresentando variações dependentes do teor adotado. Esse comportamento reforça a compreensão de que as fibras influenciam de forma mais significativa o comportamento pós-fissuração e a ductilidade do material, do que a rigidez inicial associada ao regime elástico.

Assim, o desempenho do concreto com fibras estudado neste trabalho evidencia que os maiores benefícios estruturais estão associados aos teores intermediários de fibras, nos quais se observa um equilíbrio entre ganhos mecânicos e viabilidade construtiva.

7.3 Limitações do estudo

Apesar dos resultados obtidos serem tecnicamente consistentes e alinhados com a literatura especializada, algumas limitações devem ser consideradas na interpretação dos dados. O estudo foi desenvolvido com um número restrito de traços e teores específicos de fibras, não contemplando variações no tipo de fibra, no fator de forma ou em diferentes relações água/cimento.

Além disso, os ensaios realizados focaram principalmente em propriedades mecânicas de curto prazo, até a idade de 28 dias, não sendo avaliados aspectos relacionados à durabilidade do concreto, como resistência à abrasão, permeabilidade, retração ou comportamento sob ações cíclicas e fadiga.

Outra limitação refere-se às dificuldades práticas associadas à trabalhabilidade dos concretos com elevados teores de fibras, que podem ter influenciado a homogeneidade da mistura e, conseqüentemente, alguns resultados mecânicos. Embora tenham sido realizados

ajustes com aditivo plastificante, a dispersão das fibras em teores mais elevados permanece como um desafio experimental e construtivo.

Dessa forma, os resultados devem ser analisados considerando essas limitações, não sendo recomendada sua extrapolação direta para outras condições de dosagem ou aplicação sem estudos complementares.

7.4 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nas limitações identificadas e nos resultados obtidos, recomenda-se que trabalhos futuros aprofundem a investigação do concreto reforçado com fibras de aço, contemplando a avaliação de outros tipos de fibras, diferentes fatores de forma e variações na relação água/cimento, de modo a ampliar a compreensão do comportamento do material.

Sugere-se também a realização de ensaios voltados à durabilidade do concreto com fibras, incluindo análises de retração, permeabilidade, resistência à abrasão e comportamento sob carregamentos cíclicos, visando avaliar seu desempenho em condições reais de serviço.

Outra linha de pesquisa relevante consiste na investigação do comportamento estrutural de elementos em escala real, como vigas, lajes ou pavimentos, permitindo avaliar de forma mais representativa os efeitos das fibras na redistribuição de esforços, na abertura de fissuras e na capacidade resistente pós-fissuração.

Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de estudos que busquem otimizar a dosagem de fibras e aditivos, visando conciliar desempenho mecânico, trabalhabilidade e viabilidade econômica, contribuindo para a aplicação segura e eficiente do concreto reforçado com fibras de aço na engenharia civil.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR NM 52: Agregado graúdo — Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ABNT. NBR 5732: Cimento Portland comum – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ABNT. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura. ABNT, 2015.
- ABNT. NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. ABNT, 2018.
- ABNT. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. ABNT, 2014.
- ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto. ABNT, 2022.
- ABNT. NBR 7217: Agregados — Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ABNT. NBR 7219: Agregados — Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ABNT. NBR 7222: Ensaio de tração por compressão diametral. ABNT, 2011.
- ABNT. NBR 8522: Determinação do módulo de elasticidade estático. ABNT, 2017.
- ABNT. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos e classe de resistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT. NBR 9776: Agregados — Determinação da massa específica de agregados miúdos. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- ABNT. NBR 11578: Cimento Portland composto — Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.
- ABNT. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto. ABNT, 2019.
- ABNT. NBR 12142: Ensaio de tração na flexão. ABNT, 2010.
- ABNT. NBR 12655: Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento. ABNT, 2015.
- ABNT. NBR 12655: Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento. ABNT, 2022.
- ABNT NBR 14931: Execução de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ABNT. NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ABNT. NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

- ABNT. NBR 15900: Água para amassamento. ABNT, 2009.
- ABNT. NBR 16605: Cimento Portland — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT. NBR 16607: Cimento Portland — Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. NBR 16889: Concreto de cimento Portland – Requisitos para exposição ambiental, projeto, preparo, controle e recebimento de estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ACI COMMITTEE 544. Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete. ACI 544.3R-08. American Concrete Institute, 2009.
- AFPC-AFREM. Recommandations pour l’emploi des bétons à ultra-hautes performances. France: AFGC, 2002.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Alternativas para a redução do impacto ambiental de edificações. São Paulo: Oficina de Textos, 120 p. 2011.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI: ACI, 2019.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Report on the physical properties and durability of fiber-reinforced concrete (ACI 544.5R-10). Farmington Hills, MI: ACI, 28 p. 2010.
- BAUER, L. A. FALÇÃO. Materiais de construção, 1 / coordenador L. A. Falcão Bauer; revisão técnica João Fernando Dias. – 5. Ed. Revisada. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- BANTHIA, N.; GUPTA, R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 9, p. 1405–1412, 2004.
- BARROS, Joaquim Almeida de. Concreto Reforçado com Fibras: fundamentos, propriedades e aplicações. São Paulo: PINI, 2009.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. 2nd ed. London: CRC Press, 2007.
- BUSWELL, R. A; LEAL DE SILVA, W. R; JONES, S. Z; DIRRENBERGER, J. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research. Cement and Concrete Research, v. 112, p. 37–49, 2018.

- CARNIO, M. A. (coord.); IBRACON/ABECE – Comitê Técnico CT-303. Prática Recomendada: Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras. São Paulo: IBRACON, 2016 (texto base), revisto em 2017.
- CARVALHO, ROBERT CHUST. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014 / ROBERT CHUST CARVALHO, JASSON RODRIGUES DE FIGUEIREDO FILHO. 4.ed. São Carlos: EdUFSCar, 2017.
- FANTILLI, A. P.; CHAIA, H. N. Fibras no concreto estrutural: comportamento mecânico e aplicações. Milano: Politecnico di Milano, 2013.
- FASOLO, F. Avaliação de modelos capazes de prever o comportamento à flexão simples de elementos unidirecionais de concreto reforçado com fibras de aço. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.
- FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras de aço. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2005.
- FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. São Paulo, 2011. 248f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil II, São Paulo, 2011.
- FIGUEIREDO, A. D.; GLEIZE, P. J. P.; KOENDERS, E. A. B. Desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras metálicas. EPUSP, São Paulo, 2008.
- FIGUEIREDO, A. D.; NUNES, N. L.; TANESI, J. Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete. In: Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), 2000, Lyon. Fibre-Reinforced Concretes (FRC) – BEFIB'2000. Proceedings. RILEM Publications S.A.R.L., Lyon, pp. 103–11, 2000.
- FRANUS, W.; PANEK, R.; WDOWIN, M. SEM investigation of microstructures in hydration products of Portland cement. In: 2nd International Multidisciplinary Microscopy and Microanalysis Congress, Springer Proceedings in Physics, Vol. 164, pp. 105–112, 2015.
- FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. São Paulo: 1 Ed. PINI, 2008.
- FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. São Paulo: PINI, 2012.
- GARCÍA, Á.; DELGADO, J.; DELGADO, F.; GUINEA, G. Intelligent monitoring of concrete structures: recent advances and challenges. Journal of Civil Structural Health Monitoring, v. 10, n. 4, p. 573-596, 2020.
- GRAZIANO, F. P. Projeto e execução de estruturas de concreto armado. São Paulo: O Nome da Rosa, 2005.

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço:** Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. 2010. 156p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

GRÜNEWALD, S.; WALRAVEN, J. C. Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 1793–1798, 2001.

HELENE, P. R. L. *Manual de Construção em Concreto Armado*. São Paulo: PINI, 1992.

HELENE, Paulo; ANDRADE, C. *Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo: PINI, 1993.

HELENE, P.; TERZIAN, P. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: PINI, 1993.

HELENE, P.; TERZIAN, P. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: PINI, 2007.

ISAIA, G. C. *Materiais de Construção Civil*. IBRACON, 2010a.

ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2010b.

JOHNSON, A. C. *Steel fiber reinforced concrete: performance, advantages and applications*. New York: McGraw-Hill, 2007.

JOHNSTON, C. D. *Fiber-reinforced cements and concretes*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1994.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. *Concreto reforçado com fibras: propriedades e aplicações*. São Paulo: EPUSP, 1993.

JO, M. L.; KIM, J. H. Anchorage behavior of hooked-end steel fiber in ultra-high-performance concrete. *Materials*, v. 13, n. 15, p. 1–14, 2020.

JUNIOR, E. V.; ROCHA, J. L. *Materiais avançados aplicados ao concreto reforçado com fibras: classificação e propriedades*. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. *Design and Control of Concrete Mixtures*. 15. ed. Skokie: Portland Cement Association, 2012.

MACCAFERRI DO BRASIL. *Fibras para concreto: tipos e aplicações*. São Paulo: Maccaferri, 2007.

MELLO, João. *Ensaio de caracterização do concreto fresco: Slump-Test e suas implicações na trabalhabilidade*. [S.I.], 2024.

- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MOSCATELLI, Ivo. FIBRAS DE AÇO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND APLICADOS A PAVIMENTO. 2011. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2011.
- NAAMAN, A. E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 3, p. 241–252, 2003.
- NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. Pearson, 1995.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NILSON, A. H.; DARWIN, D.; DOLAN, C. W. *Design of Concrete Structures*. 14th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- NUNES, S. et al. Influência de fibras no desempenho mecânico do concreto. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, n. 5, p. 1121–1139, 2019.
- QIAN, C.; PATNAIKUNI, I. Behaviour of steel fibre reinforced concrete beams in bending. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, n. 2, p. 103–112, 1999.
- RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, v. 36, p. 560–567, 2003.
- RODRIGUES, P. P. F. *Manual de PISOS INDUSTRIAIS: Fibras de Aço e Protendido*. São Paulo: PINI, 2010.
- ROMUALDI, J. P.; BATSON, G. B. Mechanics of crack arrest in concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, v. 89, n. EM3, p. 147-168, 1963.
- SANTOS, C. M.; COSTA, M. F.; OLIVEIRA, R. M. Concreto reforçado com fibras de aço: aplicações e vantagens em obras de infraestrutura. *Revista Técnica de Engenharia Civil*, v. 5, n. 1, p. 22-34, 2017.
- SILVA, F. A.; FIGUEIREDO, A. D. *Materiais compósitos cimentícios com fibras: propriedades e aplicações*. São Paulo: PINI, 2021.
- SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. *Materiais de construção civil: ciência e tecnologia*. 2. ed. São Paulo: PINI, 2011.
- SILVA, R. F.; COSTA, A. L.; PEREIRA, M. T.; MENDES, R. M. Inovações tecnológicas e sustentabilidade na evolução do concreto convencional. *Revista Científica de Engenharia e Tecnologia*, v. 8, n. 1, p. 55-68, 2020.

- SOBRINHO, J. A.; LIBÂNIO, A. B.; SOUSA, J. R. M. Aplicação de nanomateriais em concretos: avanços e desafios tecnológicos. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 6, n. 2, p. 104-122, 2019.
- SORELLI, L.; MEDA, A.; PLIZZARI, G. A. Steel fiber concrete slabs on ground: a structural matter. *ACI Structural Journal*, v. 110, n. 2, p. 1–10, 2013.
- WATANABE, E. A. Comportamento pós-fissuração de compósitos cimentícios reforçados com fibras metálicas submetidos à flexão em três pontos. 2008. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- YAZDANI, S. A.; GHAVAMI, K. Natural Fiber Reinforced Concrete. In: *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Kyoto, 2008.
- YOO, D. Y.; BANTHIA, N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, v. 73, p. 267–280, 2016.
- ZAINAL, S. M., HEJAZI, F., & MAFAILEH, A. M. (2023). Strengthening of reinforced concrete slabs using macro and micro synthetic fibers. *Structures*, 51, 1579–1590. DOI:10.1016/j.istruc.2023.03.120. 2023.
- ZHAO, J.; ZHANG, X.; WANG, J.; LIU, J. Effect of surface shape and content of steel fiber on mechanical properties of concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2020, Article ID 8834507, 11 p., 2020.