

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

LUCAS BORTOLUZ RECH

**ESTUDO COMPARATIVO DE FIBRAS HÍBRIDAS COMO ALTERNATIVA AO AÇO
EM CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRA**

CAXIAS DO SUL

2025

LUCAS BORTOLUZ RECH

**ESTUDO COMPARATIVO DE FIBRAS HÍBRIDAS COMO ALTERNATIVA AO AÇO
EM CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos para à obtenção do título de Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Vinicio Cecconello

CAXIAS DO SUL
2025
LUCAS BORTOLUZ RECH

ESTUDO COMPARATIVO DE FIBRAS HÍBRIDAS COMO ALTERNATIVA AO AÇO
EM CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRA

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos para à obtenção do título de Engenharia Civil.

Aprovado em: 01/12/2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vinicio Ceconello
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Luciano Zatti
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Mauricio Schafer
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso não seria possível sem o apoio, incentivo e confiança de diversas pessoas que, de formas diretas ou indiretas, contribuíram para esta etapa tão importante da minha vida acadêmica e profissional. Agradeço ao meu orientador, Vinicio, cuja dedicação, paciência e expertise foram fundamentais para estruturar e aperfeiçoar este estudo sobre concreto reforçado com fibras híbridas. Suas orientações e críticas construtivas permitiram transformar ideias em resultados concretos.

À minha mãe, Gicela, e ao meu pai, Eduardo, agradeço inexoravelmente por todo o apoio que me ofereceram durante toda a graduação. Vocês foram meu alicerce, compreendendo minhas ausências, incentivando meus estudos, e acreditando sempre no meu potencial.

Aos meus avós: Jacob, Eunézia, Armando e Inês (in memoriam), deixo meu amor e gratidão por terem sido um exemplo de vida, integridade e persistência. Suas histórias e apoio me inspiraram a nunca desistir diante dos desafios deste trabalho e da formação em Engenharia Civil.

Ao meu irmão, Matheus, meu muito obrigado pela amizade, suporte e incentivos.

À minha namorada, Eduarda, expresso minha profunda gratidão pelo amor, paciência e compreensão durante este período em que me dediquei intensamente ao trabalho. Seu apoio e presença foram fundamentais para que eu concluísse esta etapa com êxito.

Por fim, agradeço a todos os professores, colegas, técnicos de laboratório, colaboradores e à Universidade de Caxias do Sul, que de alguma forma participaram deste processo. A cada um, meu sincero reconhecimento.

A todos vocês, dedico esta conquista. Muito obrigado.

RESUMO

A busca por alternativas mais eficientes e sustentáveis na construção civil tem impulsionado o estudo de materiais capazes de substituir parcial ou totalmente o aço em estruturas de concreto. Entre essas alternativas, destaca-se o concreto reforçado com fibras, cuja incorporação proporciona melhorias significativas na resistência à flexão, controle de fissuração e durabilidade do material. De forma ainda mais promissora, o concreto com fibras híbridas combinam macro e microfibras com propriedades complementares, resultando em um comportamento sinérgico que amplia a ductilidade e a tenacidade do compósito. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de concretos com diferentes combinações de fibras no teor estabelecido como, aço, polipropileno e carbono, visando avaliar sua viabilidade como alternativa às armaduras convencionais. Na metodologia experimental realizou-se a moldagem de corpos de prova e a realização de ensaios de abatimento, absorção de água por imersão, resistência à compressão e resistência à flexão, analisando a tenacidade e ductilidade. Os resultados evidenciaram que as misturas híbridas apresentaram ganhos expressivos de resistência pós-fissuração, além de maior capacidade de absorção de energia e ductilidade em comparação ao concreto convencional, principalmente com uma proporção similar de polipropileno e carbono na mistura. De modo geral, a hibridização de fibras mostrou-se uma alternativa eficiente e sustentável, melhorando o desempenho, a durabilidade e a resistência residual do concreto.

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras. Fibras híbridas. Propriedades mecânicas. Tenacidade.

ABSTRACT

The pursuit of more efficient and sustainable alternatives in civil construction has driven the study of materials capable of partially or completely replacing steel in concrete structures. Among these alternatives, fiber-reinforced concrete stands out, as the incorporation of fibers provides significant improvements in flexural strength, crack control, and material durability. Even more promising, hybrid fiber-reinforced concrete combines macro and microfibers with complementary properties, resulting in a synergistic behavior that enhances the ductility and toughness of the composite. This study aims to analyze the mechanical behavior of concretes containing different combinations of fibers—steel, polypropylene, and carbon—at fixed proportions, in order to evaluate their feasibility as an alternative to conventional reinforcement. The experimental program included the casting of test specimens and the performance of slump tests, water absorption by immersion, compressive strength, and flexural tensile strength tests, with analysis of toughness and ductility. The results showed that the hybrid mixtures exhibited significant post-cracking strength gains, as well as greater energy absorption capacity and ductility compared to conventional concrete, especially in the mixture with a balanced proportion of polypropylene and carbon fibers. Overall, the hybridization of fibers proved to be an efficient and sustainable alternative, improving the performance, durability, and residual strength of concrete.

Keywords: Fiber-reinforced concrete. Hybrid fibers. Mechanical properties. Ductility. Toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração de tensões em um concreto sem e com fibras.....	16
Figura 2 - Características das fibras.....	19
Figura 3 – Rompimento traço sem fibras.....	19
Figura 4 - Comprimento da fibra é menor que o comprimento crítico.....	20
Figura 5 - Comprimento da fibra é igual ao comprimento crítico.....	21
Figura 6 - Comprimento da fibra é maior que o comprimento crítico.....	21
Figura 7 - Concreto reforçado com fibras – (A) Existe a compatibilidade entre fibras e agregado graúdo e (B) onde não existe.....	23
Figura 8 - Tamanho do agregado em relação as fibras.....	23
Figura 9 - Fator de forma.....	24
Figura 10 - Comportamento entre fibras frágeis e dúcteis.....	25
Figura 11 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto.....	27
Figura 12- Pavimento de concreto com armadura distribuída.....	35
Figura 13 – Pavimento de concreto com fibras.....	35
Figura 14 - Fluxograma materiais e métodos.....	38
Figura 15 – Curva granulométrica da areia.....	40
Figura 16 - Curva granulométrica da brita.....	41
Figura 17 - Fibras utilizadas.....	42
Figura 18 - Ensaio de abatimento.....	45
Figura 19 - Medidas do corpo de prova.....	48
Figura 20 - Ensaio da flexão.....	49
Figura 21 – Configuração do ensaio.....	51
Figura 22 – Adaptação para ensaio.....	51
Figura 23 - Resultado do ensaio de abatimento.....	52
Figura 24 - Exsudação CR P0,4/C0,4.....	53
Figura 25 - Exsudação CR P0,4/C0,4.....	53

Figura 26 – Absorção de água média.....	54
Figura 27 – Resistencia a compressão média.....	58
Figura 28 – Resistencia a flexão considerada.....	58
Figura 29 – CMOD.....	59
Figura 30 – Rompimento parcial CR A0,6/C0,2.....	61
Figura 31 – Arrancamento de fibras CR P0,6/C0,2.....	61
Figura 32 – Arrancamento das fibras CR P0,4/C0,4.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplos com características de macrofibras	26
Quadro 2 - Exemplos com características de microfibras	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limite de resistência a tração do aço com sua classe.....	28
Tabela 2 - Divisão das fibras poliméricas.....	29
Tabela 3 - Valores típicos das propriedades das fibras de carbono.....	33
Tabela 4 - Estudos utilizando fibras híbridas.....	36
Tabela 5 - Traços e proporções utilizadas pelos autores.....	37
Tabela 6 - Quantidade de ensaios.....	39
Tabela 7 - Dados fornecidos das fibras.....	42
Tabela 8 – Consumo de materiais para 1m ³ de concreto.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C	Relação água/cimento
A	Absorção de água por imersão (g/cm ²)
B	Largura da seção ou viga (mm)
CM	Centímetro CP – Corpo de Prova
CPV	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CP II	Cimento Portland II
CP's	Corpos de Prova
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CR	Concreto Reforçado
D	Altura da seção (mm)
F	Carga máxima (N)
FF	Fator de Forma
FIB	Fédération Internationale du Béton
FR	Resistência à Flexão
FT	Fator de Tenacidade ou Resistência à Flexão Equivalente
FRC	Fiber Reinforced Concrete (Concreto Reforçado com Fibras)
GPa	Gigapascal
H	Altura da seção (mm)
KG	Quilograma
KGF	Quilograma Força
L	Vão livre (mm)
LVDT Transformer)	Transdutor Linear de Deslocamento (Linear Variable Differential
M	Metro
MM	Milímetro
MPA	Megapascal
MT	Massa do corpo de prova no tempo t (g)
Ms	Massa seca inicial do corpo de prova (g)
Msat	Massa saturada do corpo de prova (g)
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora

NR	Norma Regulamentadora
P	Massa Específica
REF	Referência
S	Área da superfície em contato com a água (cm ²)
SLUMP	Abatimento do tronco de cone (consistência do concreto)
T	Teor de fibras
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
Tb	Área sob a curva carga × deslocamento até δ_b
μm	Micrômetro
δ_b	Deslocamento correspondente a L/150
ZTI	Zona de Transição Interfacial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivo geral	14
1.2. Objetivos específicos	14
1.3. Delimitação	15
1.4. Limitações	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. CONCRETO COM FIBRAS	16
2.2. FIBRAS	18
2.2.1. Geometria das Fibras	19
2.2.2. Propriedades físico-química e mecânica das Fibras	24
2.2.3. Macrofibras	25
2.2.3.1. Fibras de Aço	26
2.2.3.2. Fibras de Polipropileno	28
2.2.4. Microfibras	30
2.2.4.1. Fibras de Carbono	32
2.3. CONCRETO COM FIBRAS HÍBRIDAS	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	39
3.1.1. Aglomerante	39
3.1.2. Agregado Miúdo	39
3.1.3. Agregado Graúdo	40
3.1.4. Aditivo e água	41
3.1.5. Fibras	41
3.2. PRODUÇÃO DO CONCRETO	43
3.3. ENSAIOS	44
3.3.1. Abatimento	44
3.3.2. Absorção de água por imersão	46
3.3.3. Resistência à compressão axial	47
3.3.4. Resistência à flexão	48
3.3.4.1. Tenacidade pelo CMOD e ductilidade	50
4. RESULTADOS	52

4.1 ABATIMENTO.....	52
4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	54
4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	55
4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	57
4.4.1 Tenacidade pelo CMOD e ductilidade.....	59
5. CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS.....	67
APÊNDICES.....	74

1. INTRODUÇÃO

A introdução de novos materiais na construção civil tende a gerar insegurança entre profissionais que seguem métodos mais conservadores. Entretanto, com os avanços tecnológicos presentes na indústria, diversas solicitações estruturais e funcionais vêm sendo amparadas por novas soluções e opções de mercado. Cabe à engenharia, portanto, encontrar métodos e materiais capazes de atender às necessidades impostas pelas obras modernas, conciliando desempenho, durabilidade e viabilidade econômica. Nesse contexto, o Concreto Reforçado com Fibras (CRF) destaca-se como uma alternativa moderna, sustentável e eficiente frente ao concreto convencional.

Os avanços tecnológicos na construção civil têm impulsionado o desenvolvimento de materiais inovadores para atender obras de grande porte e cronogramas reduzidos. O concreto armado, amplamente utilizado, apresenta limitações como a suscetibilidade à corrosão, o elevado peso próprio e a alta demanda de mão de obra (Bina; Teixeira, 2002). Além disso, o concreto convencional possui baixa resistência à tração e vulnerabilidade a processos de degradação, o que pode comprometer sua vida útil (Mehta; Monteiro, 2014). Assim, a incorporação de fibras à matriz cimentícia surge como uma alternativa promissora, pois estas atuam como reforços descontínuos e aleatoriamente distribuídos, capazes de controlar a fissuração, aumentar a tenacidade e melhorar a capacidade de absorção de energia, principalmente no comportamento pós-fissuração (Bentur; Mindess, 2007).

Complementando essa perspectiva, o CRF apresenta melhorias significativas nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto convencional. As fibras, que podem ser de carbono, vidro, polipropileno ou outras substâncias, são incorporadas à mistura para aumentar a resistência à tração, à flexão e à fissuração (Bentur; Mindess, 2007). Esse tipo de concreto é amplamente aplicado em pisos industriais, pavimentos rodoviários e estruturas sujeitas a elevadas cargas e condições agressivas. Além disso, o uso de fibras contribui para reduzir a permeabilidade e melhorar o desempenho do material frente a impactos e variações térmicas (Innocentini, 2001).

A hibridização de fibras, resultante da combinação de macro e microfibras, reúne características complementares que potencializam o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto, podendo inclusive substituir parcial ou totalmente as

armaduras convencionais (Figueiredo, 2011). As fibras de aço aumentam a resistência à fissuração e à flexão e melhoram a ductilidade (Guimarães, 2015); as fibras de polipropileno se destacam pela leveza, resistência química e imunidade à corrosão (Medeiros, 2012); e as fibras de carbono apresentam alta resistência à tração e excelente durabilidade em ambientes agressivos (Abreu, 2021). Dessa forma, o uso combinado de fibras contribui não apenas para melhorar o desempenho estrutural, mas também para reduzir a mão de obra e acelerar o processo construtivo (Figueiredo, 2011; Bentur; Mindess, 2007).

Sendo assim, visando a aplicação prática do compósito, o trabalho visa reduzir a utilização do aço na construção civil, buscando um material capaz de oferecer desempenho estrutural equivalente ou superior. Para isso, foram propostas misturas de concreto reforçado com diferentes combinações de fibras (aço, polipropileno e carbono) selecionadas de modo a explorar suas propriedades complementares. Essas misturas foram avaliadas por meio de ensaios fundamentais, permitindo compreender o comportamento mecânico e pós-fissuração do compósito. Dessa forma, proporciona elementos capaz de verificar a viabilidade técnica da hibridização de fibras como alternativa ao aço em nossas construções.

1.1. Objetivo geral

Avaliar o uso de fibras híbridas como solução sustentável para a construção, analisando seu comportamento com e sem o aço, sua influência na resistência mecânica, no comportamento pós-fissuração e na durabilidade do concreto em aplicações práticas.

1.2. Objetivos específicos

A fim de aprofundar a análise e atingir o propósito central deste estudo, elencam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar efeitos da hibridização no estado fresco;
- b) analisar a absorção de água do concreto adicionando as fibras;
- c) avaliar a resistência à compressão dos compósitos reforçados com fibras;
- d) avaliar a resistência à tração na flexão dos compósitos reforçados com fibras;
- e) avaliar a contribuição do reforço (fibras) relacionando a tenacidade com o (CMOD) e analisar sua ductilidade;

1.3. Delimitação

Este estudo delimita-se a pesquisar o comportamento de materiais com um cimento Portland CP II, traço estipulado de 1:2,9:3,6 com relação a/c 0,66. O número de fibras foi limitado, sendo definido as variações de propriedade e proporções, além de não considerarmos elementos como temperatura e umidade.

1.4. Limitações

Alguns fatores limitaram o alcance dos resultados e devem ser destacados para a adequada compreensão dos limites deste estudo:

- a) as amostras serão avaliadas em uma idade máxima de 35 dias.

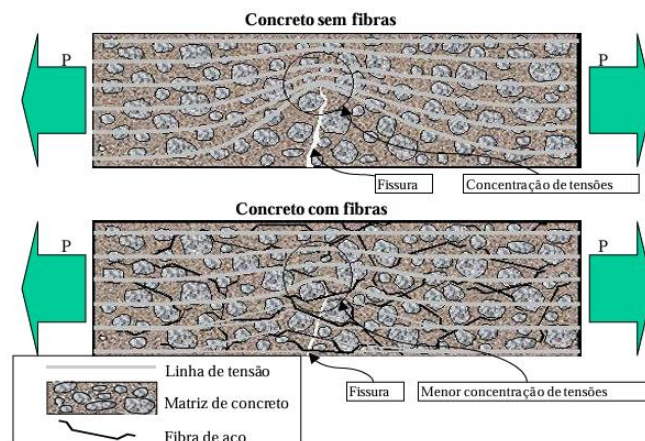
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, mas suas limitações quanto à resistência à tração, à flexão e comportamento pós-fissurações, têm incentivado a busca por alternativas tecnológicas. Nesse contexto, o uso de fibras em matrizes cimentícias surge como solução eficiente, capaz de melhorar propriedades mecânicas e reduzir fissuração. A combinação de diferentes tipos de fibras, conhecida como hibridização, potencializa esse desempenho ao reunir características complementares.

2.1. CONCRETO COM FIBRAS

O concreto, um compósito cimentício amplamente utilizado na engenharia civil, destaca-se por sua resistência a compressão, facilidade de moldagem e durabilidade. Ele é formado por cimento Portland, agregados finos e graúdos e água, podendo ter adições químicas e minerais. Essas características contribuem para sua ampla aplicabilidade em estruturas diversas. No entanto, o material também apresenta limitações, como elevada porosidade e baixa resistência à tração, que o tornam vulnerável a processos de degradação. Para seu comportamento mecânico, apresenta propriedades viscoelásticas, que exibe comportamento elástico e viscoso de forma simultânea, sendo não linear e dependente do tempo, o que o torna suscetível a efeitos como fluência, retração, fissuração térmica e variações higroscópicas, informações abordadas no livro de Mehta e Monteiro, 2014. Esses aspectos são ilustrados na Figura 1, com uma comparação do concreto sem a adição de fibras, material utilizado para reduzir estas fragilidades e o concreto com sua adição.

Figura 1 - Concentração de tensões em um concreto sem e com fibras



Fonte: Figueiredo (2011)

Levando em consideração as informações apontadas e ilustradas, observa-se no material, deficiências mecânicas. Uma forma tradicional e amplamente consolidada para mitigar essa limitação é a introdução de armaduras, que são elementos contínuos, estrategicamente posicionados para absorver os esforços de tração que a matriz cimentícia não consegue suportar (Bentur; Mindess, 2007). Além das armaduras, como ilustrado na Figura 1, visando aprimorar o desempenho da matriz, a alternativa coerente, é a incorporação de fibras, as quais são elementos descontínuos dispersos aleatoriamente no interior do concreto. As fibras atuam de maneira eficaz no controle da fissuração e no aumento da tenacidade do material, principalmente no comportamento pós-fissuração, promovendo maior capacidade de absorção de energia, resistência residual e ductilidade (Bentur; Mindess, 2007).

Vale destacar que fibras e armaduras possuem funções distintas e, em determinadas situações, podem inclusive coexistir no mesmo elemento estrutural. Empregadas para resistir diretamente as tensões atuantes, as armaduras possuem uma posição de projeto excelente para regiões sujeitas a esforços concentrados. Diferente das fibras, que apresentam desempenho limitado devido à sua orientação aleatória na matriz (ACI 544, 2002).

Com isso, segundo a publicação da FIB (Fédération Internationale du Béton, 2013), onde a resistência a flexão é crucial, como em paredes e vigas, o concreto com fibras não substitui a armadura. Entretanto, em estruturas apoiadas diretamente sobre o solo, onde os esforços são predominantemente distribuídos, as fibras podem atuar de forma eficaz como reforço, podendo inclusive reduzir ou eliminar o uso de armaduras convencionais, dependendo do caso e projeto (Bentur; Mindess, 2007).

Somado a isso, devido ao alto módulo de deformação das fibras, resiste aos esforços de tração, reduzindo os índices de fissuração do elemento, gerando um material com elevado índice de ductibilidade e boa capacidade de redistribuição dos esforços. O número de juntas de dilatação é reduzido devido às tensões geradas no interior das placas (Chodounsky; Viecili, 2007). Vale ressaltar, que o desempenho final de um compósito cimentício reforçado com fibras (CRF) é resultado da interação entre as propriedades da matriz e das fibras incorporadas. O concreto contribui à mistura características como a resistência a compressão, módulo de elasticidade e capacidade de deformação, enquanto as fibras influenciam o comportamento pós-fissuração e a tenacidade do material (Bentur; Mindess, 2007; Mehta; Monteiro, 2014).

Além das propriedades mecânicas, outro atributo que difere o concreto com armadura para a opção das fibras, é a sua execução. Salientando a não utilização das barras ou malhas convencionais, resulta na redução da mão de obra especializada e dos custos com materiais. Além disso, o uso de fibras contribui para a otimização do espaço no canteiro de obras, uma vez que dispensa a estocagem de materiais volumosos, promovendo maior organização no local de trabalho (Bina e Teixeira, 2002).

No entanto, Bina e Teixeira (2002) ressaltam que o sucesso da execução do concreto com fibras depende de um rigoroso controle tecnológico durante a mistura, uma vez que a homogeneidade da combinação é essencial para evitar a formação de "ouriços", que são aglomerados de fibras que podem comprometer o desempenho do concreto. Por isso, em alguns casos é adotado um sistema misto, no qual as fibras complementam a armadura convencional. Nesse sistema, as fibras atuam principalmente no controle de fissuras por retração e variações térmicas, enquanto as armaduras são responsáveis pela resistência aos carregamentos estáticos e dinâmicos, proporcionando um desempenho otimizado e durável.

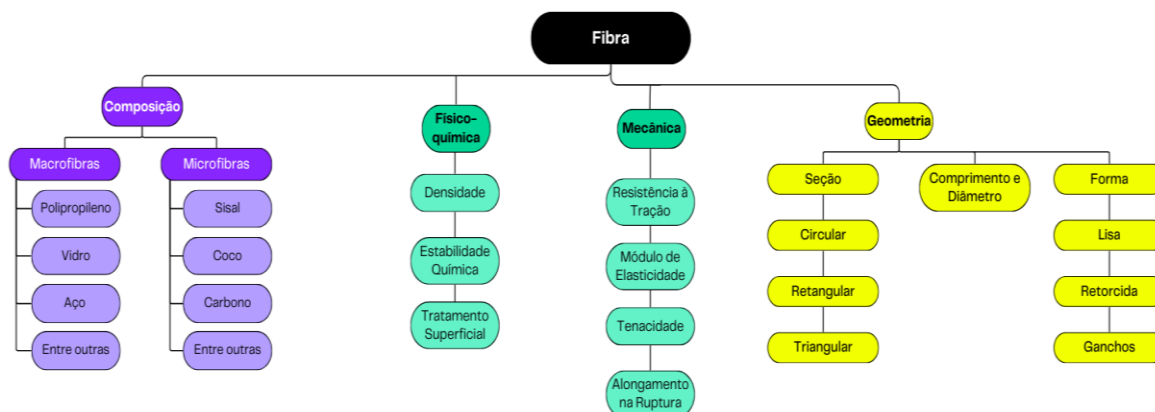
Para questões de normativa, a NBR 16938:2021 (ABNT, 2021), estabelece os procedimentos para qualificação e controle da qualidade do concreto reforçado com fibras (CRF), a mesma não considera o concreto projetado. A norma embasa os profissionais definindo critérios de qualificação inicial do material, por meio de ensaios de resistência à flexão com a NBR 12142:2010 (ABNT, 2010), e a compressão, sendo a NBR 5739:2018 (ABNT, 2018). Durante a obra, o controle tecnológico envolve outras verificações, como a norma de consistência, NBR 16889:2018 (ABNT, 2018), ou NBR 15823-2:2017 (ABNT, 2017), somado ao teor de fibras e a resistência mecânica conforme a NBR 12655:2022 (ABNT, 2022). O projeto deve ser amparado adicionando outras normativas a análise, como a NBR 16935:2021 (ABNT, 2021), (projeto), NBR 15530:2019 (ABNT, 2019), (fibras de aço), e outras normas específicas de fibras, se forem pertinentes.

2.2. FIBRAS

As fibras são elementos descontínuos, com diferentes formatos e tamanhos, sendo derivadas de diferentes materiais. Podem ser divididas por quatro categorias, como o concreto reforçado com fibras de aço, vidro, sintéticas e naturais (ACI 544,

2002). Com distintas propriedades mecânicas, físicas e químicas, utilizadas como apresentado anteriormente, sendo minúsculos reforços em matrizes cimentícias, distribuindo as tensões dos materiais e com características como aponta a Figura 2 (Figueiredo, 2011).

Figura 2 - Características das fibras



Fonte: Adaptado de Naaman (2000)

2.2.1. Geometria das Fibras

A geometria das fibras exerce uma influência decisiva na aderência dos compósitos, impactando diretamente tanto o desempenho do material após o aparecimento de fissuras quanto sua capacidade de deformação (ductilidade). As suas propriedades incluem variáveis como o formato da seção transversal, o comprimento, o diâmetro, sendo ele equivalente ou não, e as características da superfície, todos fatores que influenciam significativamente o comportamento mecânico do compósito, ainda mais se compararmos com o comportamento de rompimento de um traço sem a adição de fibras, conforme Figura 3 (Quinino, 2015).

Figura 3 – Rompimento traço sem fibras

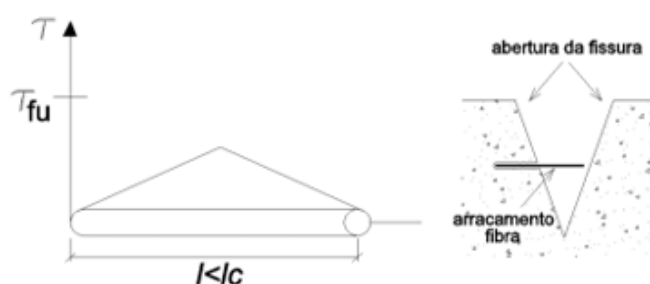


Fonte: Quinino (2015)

Algumas modificações geométricas, como a presença de ganchos nas extremidades das fibras, exercem influência significativa sobre o desempenho dos compósitos reforçados com fibras (CRF). Tais ancoragens aumentam a resistência do compósito nas fases iniciais de deformação, em comparação com fibras lisas, e favorecem a manutenção da capacidade resistente após o aparecimento de fissuras. Esse comportamento decorre do aumento das tensões de ligação entre a fibra e a matriz durante o arrancamento, uma vez que as fibras com ganchos estabelecem um vínculo mais eficiente do que as fibras retas. Apesar disso, com estes ganchos, o elemento apresenta maior instabilidade pós-pico, associado ao elevado nível de resistência residual atingido. Com o aumento do deslocamento, essas tensões se intensificam e podem provocar falhas em regiões plastificadas próximas às extremidades ancoradas (Figueiredo; Torneri, 2006; Shah; Skarendahl, 1985).

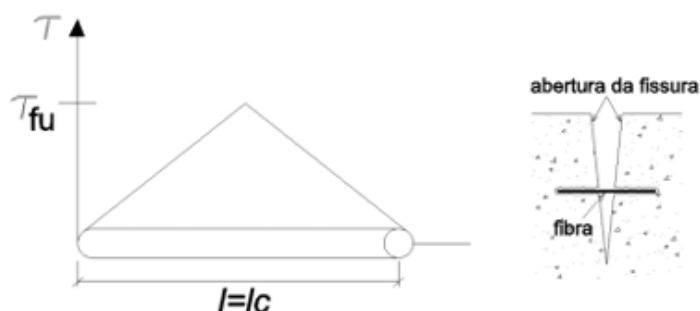
Outro aspecto que pode ser aprimorado relacionando a geometria das fibras ao longo de seu comprimento, é a aderência. A fim de melhorar a interação interna entre os materiais (fibra e matriz cimentícia), é introduzido à superfície deformações mecânicas, como corrugações, ondulações e torções, além das modificações de ancoragem, já abordadas no estudo (Gava, 2006). Somado a isso, o aumento do comprimento contribui para melhorar a tensão de aderência, favorecendo o desempenho após o desgaste inicial. No entanto, é essencial equilibrar esse aumento com a resistência da matriz, evitando que a fibra se rompa antes de deslizar. Uma elevação excessiva na força de atrito pode ocasionar essa abertura, comprometendo a capacidade de absorção de energia do compósito após a fissuração (Figueiredo, Nunes e Tanesi, 2000). Tal importância, pode ser visualizada na Figura 3, Figura 4 e Figura 5, apresentando comportamentos onde o comprimento da fibra é menor, igual ou maior que o comprimento crítico.

Figura 4 - Comprimento da fibra é menor que o comprimento crítico



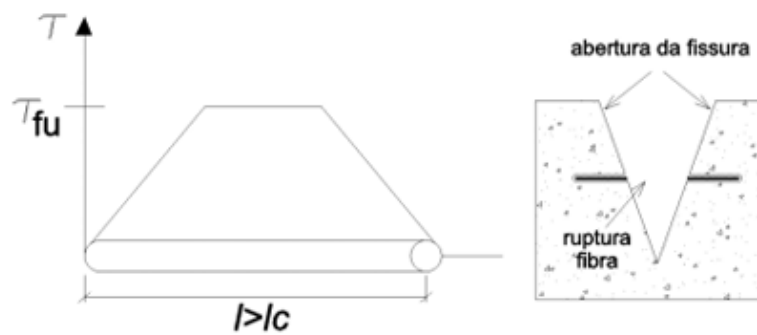
Fonte: Bentur; Mindess (2007) apud Diego Guimarães (2015)

Figura 5 - Comprimento da fibra é igual ao comprimento crítico



Fonte: Bentur; Mindess (2007) apud Diego Guimarães (2015)

Figura 6 - Comprimento da fibra é maior que o comprimento crítico



Fonte: Bentur; Mindess (2007) apud Diego Guimarães (2015)

Desde os primeiros estudos referente a fibras, conforme o modelo “shear-lag” de Cox (1952), podemos considerar que a distribuição de tensões ao longo da fibra no concreto, ocorre de maneira crescente linear, partindo dos extremos em direção ao centro. Desta forma, é possível prever o comportamento mecânico do compósito sob tração, entendendo essa transferência de carga da matriz. Outro material arcaico, porém, corroborado pelos novos estudos, é o de Morley (1972), que indica a propagação das fissuras tendendo a ocorrer perpendicularmente à direção das fibras, tornando possível também, estimar a distribuição de tensões ao longo da superfície da fibra, o que possibilita definir o conceito de comprimento crítico (l_c), isto é, o comprimento (l) no qual a fibra atinge a tensão necessária para atuar de maneira efetiva.

Desenvolve-se, então, uma tensão na fibra equivalente à ruptura (T_{fu}), como ilustrado nas figuras. Representado pela Figura 3, quando o comprimento da fibra é inferior ao comprimento crítico (l_c), a tensão desenvolvida ao longo da fibra não atinge o valor necessário para provocar sua ruptura, resultando no arrancamento da fibra da

matriz. Esse comportamento é evidenciado por ensaios de arrancamento, como o caso de Pereira (2021), determinando o comprimento crítico da fibra e a tensão cisalhante. Quando o comprimento da fibra em um compósito é igual ao comprimento crítico (l_c), conforme figura 4, a tensão desenvolvida ao longo da fibra alcança o valor necessário para romper rompê-la na sua seção central, onde a tensão é máxima. Nessa condição, a fibra começa a contribuir de forma efetiva para a resistência mecânica do compósito Cox (1952).

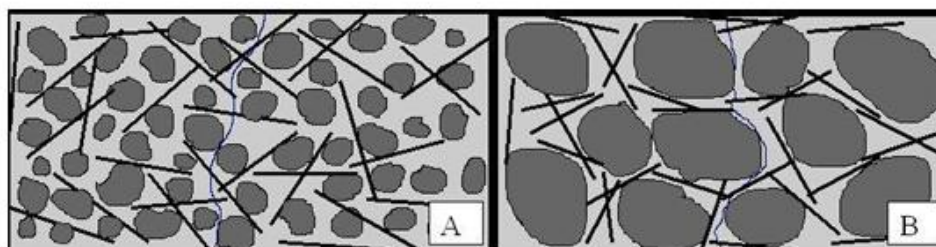
Quando o comprimento da fibra ultrapassa o comprimento crítico (l_c), observado na Figura 5, as tensões desenvolvidas na fibra excedem a tensão de cisalhamento (T_{fu}). Sendo assim, apesar de entre os casos apresentados ser a melhor opção, a fibra pode não suportar o excesso de carga, levando à sua ruptura ou a uma redução no escorregamento previsto. Entretanto, se a fibra apresentar elevada ductilidade, pode ocorrer seu encolhimento antes da ruptura. Desta forma, evidencia a importância do equilíbrio entre a resistência a tração da fibra e a tensão de cisalhamento na interface para evitar falhas prematuras (Bentur; Mindess, 1990; Quinino, 2015).

Assegurando um desempenho eficiente, é recomendado que o comprimento das fibras seja de cinco a dez vezes maior que o comprimento crítico, o que permite uma transferência de carga mais eficaz entre a matriz e a fibra, cerca de 90%. Quando o comprimento da fibra atinge ou ultrapassa o comprimento crítico, a ruptura tende a ocorrer de forma progressiva, caracterizando um comportamento mais dúctil. Por outro lado, se o comprimento da fibra exceder apenas o limite elástico, mas não o comprimento crítico, a ruptura pode ocorrer de maneira abrupta, sem o descolamento da fibra em relação à matriz (Figueiredo, 2011).

Essa compatibilidade permite que as fibras atuem como pontes de transferência de tensões entre os agregados, não se limitando apenas à argamassa. Além disso, a zona de transição interfacial (ZTI) entre a fibra e a matriz é frequentemente o local de início das fissuras, sendo, portanto, crucial considerar essa região no projeto do compósito. Entretanto, quanto maior for o volume de fibras incorporadas, pior será a trabalhabilidade da mistura, da mesma maneira que agregados de grandes dimensões dificultam o adensamento das fibras no estado fresco, como mostrado na Figura 7. Sendo assim, a importância do equilíbrio entre as proporções de fibras e agregados é fundamental para garantir a performance

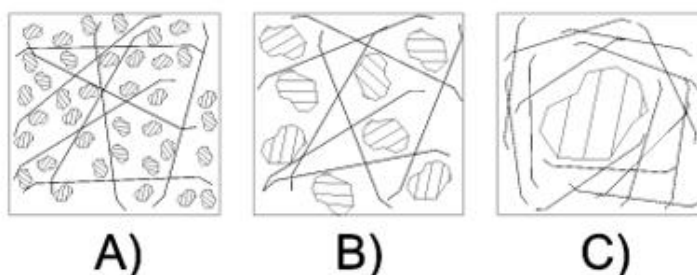
desejada do compósito, também analisada na Figura 8 (Figueiredo; Abou Mourad; Carvalho, 2000; Fernandes, 2019).

Figura 7 - Concreto reforçado com fibras – (A) Existe a compatibilidade entre fibras e agregado graúdo e (B) onde não existe



Fonte: Figueiredo (2011)

Figura 8 - Tamanho do agregado em relação as fibras



Fonte: Hannant (1978) apud Guimarães (2015)

Conforme ilustrado na Figura 7 b), a compatibilidade dimensional entre fibras e agregados é alcançada. Recomenda-se que o comprimento das fibras seja, no mínimo, o dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo, garantindo que as fibras atuem efetivamente como elementos de transferência de tensões nas fissuras (Figueiredo, 2000). Em elementos como pisos (pavimentos), onde as restrições são menores, é possível empregar fibras mais longas, com comprimentos de até 60 mm, compatíveis com agregados de maiores dimensões (19 mm a 25 mm). Fibras mais longas proporcionam maior comprimento embutido na matriz, aumentando o atrito na interface fibra-matriz, o que eleva a parcela de transferência de tensões por atrito em detrimento da transferência elástica, impactando na tenacidade e ductilidade do material (ACI 544, 2002).

Outro elemento que influencia diretamente no comportamento mecânico do compósito, é a seção transversal. Sendo ela muito pequena, diminui a carga necessária para o arrancamento das fibras, que com menor seção transversal,

apresenta maior área superficial, reduzindo a quantidade de água e impactando na fluidez da mistura. Além disso, quando a fibra é pequena, torna-se ineficaz, não contribuindo com suas propriedades para a matriz, como apresentado na Figura 7 (Figueiredo, 2011).

Ademais, podemos considerar o fator de forma como um elemento preponderante para o desempenho e tenacidade do compósito. Em suma, quanto maior foi o fator de forma (FF), melhor serão as propriedades do material. Desta forma, haverá uma maior quantidade de fibras capazes de interceptar as fissuras. Mantendo o comprimento da fibra e reduzindo seu diâmetro, aumenta-se o número de fibras no compósito, potencializando sua capacidade de reforço. Cabe ressaltar, que o fator de forma (FF) é uma relação adimensional que correlaciona o comprimento da fibra ao seu diâmetro equivalente ($FF = l/d$) (Bentur; Mindess, 2007; Góis, 2015). Essa relação é ilustrada na Figura 9.

Figura 9 - Fator de forma



Fonte: BELGO BEKAERT ARAMES (2013) apud Diego Guimarães (2015)

No entanto, vale ressaltar que as ancoragens podem minimizar os efeitos do aumento do fator de forma, uma vez que, conforme ilustrado na Figura 8, elas reduzem o valor de l (Góis, 2015).

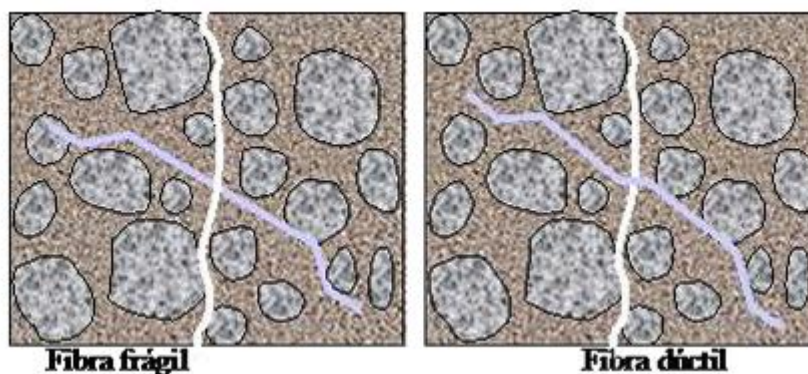
2.2.2. Propriedades físico-química e mecânica das Fibras

As fibras são adicionadas na fase de mistura do concreto, podendo ser introduzidas diretamente na máquina de mistura (betoneira ou caminhão betoneira) ou através de um sistema de dosagem automático. Elas podem apresentar um comportamento dúctil, deformando bastante antes de entrar no estado de rompimento, absorvendo bastante energia e apresentando comportamento previsíveis antes da falha, ou, podem apresentar um comportamento frágil, quebrando sem muita deformação (ACI 544, 2002).

Levando em consideração essas características, o material frágil pode apresentar maior perda de eficiência devido à sua inclinação em relação ao plano de ruptura. Isso se deve ao alto nível de tensão de cisalhamento que elas suportam nessa

condição. Caso não consigam se deformar plasticamente para se alinharem ao esforço principal, acabam se rompendo por cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 10 (Figueiredo, 2011; Silva; Mobasher, B, 2020).

Figura 10 - Comportamento entre fibras frágeis e dúcteis



Fonte: Figueiredo (2011)

Tratando sobre a relação entre os módulos de elasticidade da fibra e da matriz cimentícia, a mistura pode resultar em alteração na propriedade inicial dos materiais. Quando ocorre a adição de fibras com um módulo de elasticidade maior pode aumentar o módulo de elasticidade do concreto, tornando-o mais rígido. Já quando ocorre a redução, a adição de fibras com um módulo de elasticidade menor pode, em alguns casos, reduzir o módulo de elasticidade do concreto, tornando-o mais flexível. Podendo também, não gerar mudanças significativas com a mistura (Bentur; Mindess, 2007).

Com base nisso, é comum distinguir as fibras também pelo tamanho, especialmente quando se trata de sua aplicação estrutural ou funcional. Essa classificação considera o comprimento, o diâmetro e o efeito das fibras no desempenho do material em que são incorporadas (Silva; Mobasher, B, 2020). Desta forma, tendo em conta estes aspectos dimensionais, as fibras podem ser classificadas em macrofibras e microfibras, cada uma com finalidades específicas no reforço do material.

2.2.3. Macrofibras

Conforme já abordado, com a ocorrência de deformações no compósito, as fibras de maiores comprimentos passam a atuar de forma mais significativa, dificultando a propagação das fissuras. Esse mecanismo contribui para retardar a redução da carga máxima suportada pelo material, resultando em melhorias na resistência mecânica, rigidez e ductilidade. A introdução de macrofibras pode alterar

o modo de ruptura do compósito. Ao invés de ocorrer a simples perda da integridade da matriz, a falha passa a estar associada ao arrancamento ou à ruptura das fibras. O uso de fibras mais longas, combinado com sistemas de ancoragem mais eficazes, favorece sua fixação na matriz, dificultando o processo de arrancamento e permitindo que as fibras atuem até atingir sua resistência máxima à tração, o que promove um desempenho mais eficiente do compósito (Lawler; Zampini; Shah, 2003).

Em relação a sua geometria, a macrofibra tem um comprimento maior que 25 mm e diâmetro ou espessura superior a 0,3 mm, desta forma, são utilizadas para substituir ou complementar armaduras convencionais em concreto. Conseguimos observar alguns exemplos, conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Exemplos com características de macrofibras

Tipo de Macrofibra	Material	Diâmetro	Observações
Aço	Aço carbono	0,75 – 1,2 mm	Alta resistência à tração, comum em pavimentos industriais.
Polipropileno	Polímero sintético	≥ 0,3 mm	Boa resistência química, leve, melhora a tenacidade do concreto
Nylon	Polímero sintético	≥ 0,3 mm	Boa aderência ao concreto, resistente à tração.
Vidro	Fibra de vidro	≥ 0,5 mm	Usada em aplicações com preocupação estética ou leveza.
Basalto	Fibra mineral	≥ 0,5 mm	Boa resistência mecânica e química, não corrosiva.

Fonte: Adaptado de Guimarães (2015); Colombo (2020); Sousa; Albertim (2016); Schiavon (2007)

Com base nas informações trazidas anteriormente, adicionando características de material, diâmetros e ponderações importantes referente as propriedades destes materiais, para o presente trabalho, foram definidas a utilização da fibra de aço e polipropileno para o traço estipulado.








2.2.3.1. Fibras de Aço

Conforme apontado por Figueiredo (2000), sua aplicação é eficaz na mitigação de limitações características da matriz cimentícia, como a baixa capacidade de dissipação de energia. Devido ao seu elevado módulo de elasticidade, as fibras de aço promovem a formação de múltiplas fissuras finas e melhoram substancialmente a resposta pós-fissuração do concreto reforçado com fibras (CRF), contribuindo para o

aumento da tenacidade do material. Além disso, a presença dessas fibras colabora para a preservação da coesão do compósito, limitando deformações excessivas e evitando colapsos abruptos (Brandt, 2008; Guimarães, 2015).

Os métodos mais comuns empregados na fabricação de fibras de aço incluem a extrusão, a trefilação e a laminação. Segundo a norma NBR 15530:2019 (ABNT, 2019), essas fibras são classificadas de acordo com sua procedência: Classe I corresponde às produzidas a partir de arame trefilado a frio; Classe II refere-se às obtidas por corte de chapas laminadas a frio; e Classe III inclui as fibras fabricadas com arame trefilado que passam por processo de escarificação. Quanto às dimensões, essas fibras geralmente apresentam comprimentos variando entre 25 mm e 60 mm. Em relação à geometria, a norma também estabelece categorias baseadas na forma física: tipo A, com extremidades ancoradas; tipo B, com superfície corrugada; e tipo R, com configuração retilínea (Bentur; Mindess, 2007; NBR 15530, 2019). Essas classificações estão ilustradas na Figura 11.

Figura 11 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto

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

Fonte: Figueiredo (2011)

Conforme mencionado anteriormente, as propriedades geométricas das fibras exercem influência direta sobre o desempenho do concreto reforçado com fibras. A norma ABNT NBR 15530:2019 trata de dois aspectos fundamentais: a geometria das fibras e a resistência do aço utilizado em sua fabricação. Além disso, define parâmetros mínimos de desempenho para o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), com destaque para os valores mínimos de fator de forma, fundamentais para garantir a atuação eficaz das fibras na etapa pós-fissuração (Figueiredo, 2008). Para

cada tipo de fibra, são estabelecidas faixas de tolerância que buscam reduzir a variabilidade no comportamento mecânico após a formação de fissuras. Outro ponto relevante abordado pela norma é o limite mínimo de resistência a tração do aço, conforme apresentado na Tabela 1 (Brandt, 2008; Guimarães, 2015).

Tabela 1 - Limite de resistência a tração do aço com sua classe

Tipo (Geometria)	Classe de fibra	Fator de forma mínimo	Limite de resistência à tração do aço (MPa)
A	I	40	1000
	II	30	500
C	I	40	800
	II	30	500
	III	30	800
R	I	40	1000
	II	30	500

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

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15530 (2019)

Com esta definição do nível de resistência mínima do aço e a respectiva classe da fibra, somado ao fator de forma mínimo, obtermos parâmetros normativos para a execução do CRF com a fibra de aço.

2.2.3.2. Fibras de Polipropileno

A incorporação de fibras de polipropileno em compósitos cimentícios tem se consolidado como uma técnica eficaz para melhorar propriedades mecânicas e de durabilidade, especialmente em relação ao controle de fissuração e ao desempenho em estado fresco e endurecido (Bentur; Mindess, 2007). Essas fibras sintéticas pertencem ao grupo dos polímeros termoplásticos derivados do monômero C₃H₆, obtido por meio da síntese de compostos orgânicos a partir do petróleo (Félix, 2002).

Essas fibras, são amplamente reconhecidas por sua diversidade em formas (monofilamentos, multifilamentos ou feixes, e filmes fibrilados), tamanhos e propriedades mecânicas. As fibras podem assumir formatos como cilindros contínuos, filmes ou fitas, sendo muitas vezes dispostas em estruturas de malha, o que favorece a aderência à matriz cimentícia devido ao seu entrelaçamento (Félix, 2002; Bentur; Mindess, 2007).

Segundo a normativa UNE-EN 14889-2:2008, as fibras poliméricas são divididas conforme Tabela 2:

Tabela 2 - Divisão das fibras poliméricas

Tipo	Classe	Diâmetro
Macrofibras	II	> 0,30 mm
Microfibras	I	< 0,30 mm
Microfibras subdivide-se em duas classes:		
Tipo	Classe	
Monofilamentos	Ia	
Fibriladas	Ib	

Fonte: Adaptado de AENOR (2008)

Conforme divisão apresentada, podemos considerar as microfibras de monofilamentos como pequenos fios de mesmo comprimento, já as fibriladas, como estrutura reticulada formada por filamentos finos entrelaçados.

Em relação às suas propriedades, as microfibras, geralmente com comprimento variando entre 3 mm e 12 mm, podendo chegar a 20 mm conforme o fabricante, são comumente utilizadas para reduzir a exsudação e mitigar fissuras por retração plástica durante a fase inicial de cura do concreto (The Concrete Society, 2007). Já as macrofibras, que apresentam dimensões comparáveis às fibras metálicas, contribuem significativamente para a resistência residual pós-fissuração e para a absorção de energia sob carregamentos dinâmicos (Leite, 2018).

As fibras de polipropileno se destacam por sua alta resistência a ambientes alcalinos, elevado ponto de fusão, baixa massa específica e excelente estabilidade química. Essas características conferem ao material uma excelente durabilidade, com vida útil estimada superior a 30 anos em condições diversas (Hannant, 2003; Rodrigues; Montardo, 2002). Além disso, apesar de seu uso não aumentar significativamente a resistência à tração do concreto, as fibras de polipropileno colaboram para melhorar a deformabilidade, a rigidez, a resistência ao impacto e o

controle da fissuração. Isso se deve, em parte, ao fato de o material ser quimicamente inerte, não absorver água e ser imune à corrosão, possuindo baixa condutividade térmica e apresentando um custo competitivo, o que reforça sua atratividade em aplicações na construção civil (Medeiros, 2012; Rodrigues; Montardo, 2002).

A eficácia das fibras de polipropileno é ainda mais evidente nas primeiras horas de cura, quando o concreto ainda está em estado plástico, apresentando alteração no volume da mistura, baixa resistência e módulo de elasticidade. Nessa fase, a dispersão aleatória das fibras em grandes quantidades permite que atuem de maneira eficaz como elemento de reforço (Tanesi; Agopyan, 1997).

Devido ao seu ponto de fusão relativamente baixo, as fibras de polipropileno se vaporizam em temperaturas inferiores a 300 °C, o que contribui significativamente para a mitigação de danos em situações de incêndio. Durante a exposição ao calor, essas fibras se decompõem termicamente, permitindo o escoamento do vapor de água presente na matriz cimentícia. Esse fenômeno auxilia na dissipação da pressão interna, reduzindo assim o risco de fissuração explosiva e colapso estrutural em altas temperaturas (Resende, 2025).

No que diz respeito às exigências normativas nacionais, a utilização de fibras de polipropileno em compósitos cimentícios está regulamentada pela NBR 16942:2021 (ABNT, 2021), que estabelece os requisitos mínimos e os métodos de ensaio para avaliação do desempenho desse material. Contudo, considerando que essa norma ainda está em sua primeira edição, análises mais aprofundadas e comparativas podem ser embasadas pela norma europeia UNE-EN 14889-2:2008, a qual apresenta critérios técnicos detalhados quanto à classificação, características físicas e requisitos de desempenho das fibras poliméricas para uso em concretos (Aenor, 2008).

2.2.4. Microfibras

Em comparação com as macrofibras, as microfibras, de modo geral, representam um importante desempenho de reforço nos compósitos cimentícios, principalmente durante a fase inicial de cura do concreto, sendo o estado fresco. Nessa etapa, o concreto está particularmente suscetível à formação de microfissuras causadas por retração plástica, exsudação da água livre e gradientes térmicos superficiais. Desta forma, elas atuam como elementos de reforço tridimensional, criando uma malha interna que restringe os deslocamentos diferenciais e limita a

segregação dos materiais, contribuindo para a redução da exsudação e, conseqüentemente, prevenindo o surgimento precoce de fissuras, dificultando o crescimento de microtrincas (Figueiredo, 2005; The Concrete Society, 2007).

Além da função mecânica, as microfibras também oferecem benefícios adicionais no que diz respeito à durabilidade do concreto. Sua presença reduz a permeabilidade superficial, limitando a penetração de agentes agressivos, o que contribui para o aumento da vida útil da estrutura (Manfro, 2024). No entanto, elas não impedem o alongamento das trincas. Quando não são ativadas antes da junção das fissuras, a eficiência do compósito é significativamente reduzida, e as microfibras passam a se comportar de forma semelhante às macrofibras, embora com uma eficácia inferior na prevenção das trincas e com menor capacidade de absorção de energia (Lawler; Wilhelm; Zampini; Shah, 2003; Leite, 2018).

Um fator crítico para o desempenho das microfibras é o espaçamento entre os filamentos, considerado mais determinante do que o diâmetro ou o comprimento unitário. Quanto menor o espaçamento entre fibras na matriz, maior será a resistência à formação e propagação de fissuras. Fibras curtas e finas tendem a apresentar melhor dispersão homogênea na matriz cimentícia, criando mais pontos de ancoragem e dissipação de energia durante o processo de fratura (Quinino, 2015; Manfro, 2024). Para entendimento, observa-se alguns exemplos, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Exemplos com características de microfibras

Tipo de Microfibra	Material	Diâmetro (µm)	Observações
Polipropileno	Polímero sintético	10 – 50	Alta resistência química, usada para fissuras plásticas.
Carbono	Sintética	5 – 10	Elevada resistência à tração e módulo elástico, custo elevado e excelente desempenho mecânico.
Sisal	Natural	50 - 300	Renovável e biodegradável, boa aderência à matriz, e sensível à umidade e degradação alcalina.
Celulose	Natural	20 - 50	Biodegradável, baixo custo e menos durável em ambientes úmidos.

Fonte: Adaptado de Manfro (2024); Quinino (2015); Leite (2018); Pescarolo (2021)

2.2.4.1. Fibras de Carbono

As fibras de carbono são produzidas a partir da carbonização ou pirólise de filamentos orgânicos submetidos a temperaturas elevadas, que variam entre 1.000 °C e 3.000 °C. Esse processo térmico promove a decomposição de materiais com alto teor de carbono, preservando a estrutura fibrosa original e resultando na formação de resíduos predominantemente carbonáceos, ou seja, compostos ricos em carbono. As principais matérias-primas utilizadas nesse processo são o rayon (um polímero celulósico), a poliacrilonitrila (PAN) e o piche, derivado do petróleo ou do carvão (Askeland; Phulé, 2003). A fabricação dessas fibras envolve várias etapas fundamentais, como estabilização, carbonização, grafitação e tratamento superficial, as quais exigem controle rigoroso de variáveis como tensão aplicada, tipo de atmosfera, tempo de exposição e temperatura. Dependendo do tipo e da intensidade do tratamento aplicado, é possível obter fibras com diferentes níveis de resistência mecânica e módulo de elasticidade, adequando-as às mais diversas aplicações tecnológicas (Quinino, 2015).

Os filamentos de fibras de carbono podem ser desenvolvidos com diferentes orientações estruturais, o que permite sua adequação a diversas aplicações, conforme as exigências de projeto. Fibras com alto módulo de elasticidade e elevada resistência à tração, por exemplo, são obtidas por meio de tratamentos térmicos mais rigorosos, sendo especialmente recomendadas para situações em que a resistência mecânica é um fator crítico (Arquez, 2010).

Essas características tornam as fibras de carbono ideais para uso em compósitos com função estrutural, proporcionando materiais com elevada rigidez e baixa densidade. A relação resistência/peso alcançada por esses compósitos pode superar em até cinco vezes a do aço, o que representa uma vantagem significativa em aplicações que exigem leveza e desempenho (Fugiyama, 2021). Além disso, as fibras de carbono apresentam excelente durabilidade e capacidade de adaptação a formas geométricas complexas, facilitando sua aplicação em estruturas com geometrias variadas. Quando incorporadas ao concreto, essas fibras também contribuem para o aumento da ductilidade do material, ampliando sua capacidade de deformação (Le et al., 2013; ACI 544, 2002). As propriedades mecânicas resultantes dessa incorporação estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores típicos das propriedades das fibras de carbono

Fibra de carbono	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistencia a tração (GPa)
Uso geral	220 – 240	2,05 – 3,79
Resistência elevada	220 – 240	3,79 – 4,82
Resistência Ultra-Elevada	220 – 240	4,82 – 6,20
Módulo elevado	340 – 520	1,72 – 3,10
Módulo Ultra-Elevado	520 – 690	1,38 – 2,40

Fonte: ACI 440 (2002)

Entretanto, apesar de suas propriedades superiores, a utilização das fibras de carbono em larga escala ainda enfrenta como principal entrave o alto custo de produção. Esse custo elevado está diretamente relacionado à complexidade do processo de fabricação, que exige controle preciso de diversas variáveis operacionais, além de alto consumo energético, fatores que encarecem significativamente o produto final (Pestana, 2017; Abreu, 2021).

2.3. CONCRETO COM FIBRAS HÍBRIDAS

Considerando os aspectos previamente abordados, o concreto reforçado com fibras é tratado neste trabalho como uma alternativa de aprimoramento da matriz cimentícia convencional. A análise contempla a contextualização e caracterização das fibras, considerando suas propriedades mecânicas e geométricas, além da classificação dos diferentes tipos utilizados, com ênfase nas especificações relevantes para esta pesquisa. A partir disso, define-se o objeto de estudo com a combinação de dois tipos de fibras, macrofibras e microfibras, com o intuito de, por meio de ensaios específicos, obter dados que subsidiem escolhas técnicas mais eficazes na construção civil.

O material consiste na adição simultânea de dois ou mais tipos de fibras com características distintas, podendo ser metálicas e sintéticas, por exemplo, acrescentadas ao compósito cimentício. O objetivo dessa combinação é otimizar o desempenho do concreto ao longo de todo o processo de solitação, desde o surgimento das primeiras fissuras até a ruptura final, com maior resistência à flexão, tenacidade e o próprio controle destas fissuras (Quinino, 2015, Albertim, 2016).

Na fase inicial, caracterizada pela presença de microfissuras dispersas na matriz cimentícia, as macrofibras não apresentam contribuição significativa, e a atuação das microfibras ainda é bastante limitada. À medida que essas microfissuras

começam a se unir, formando fissuras mais definidas, as microfibras passam a exercer papel relevante no controle da propagação das trincas. Com o avanço da fissuração, as macrofibras são progressivamente solicitadas, assumindo uma função predominante no reforço do compósito. Essas fibras atuam de forma a "costurar" a matriz, aumentando a resistência à propagação das fissuras e contribuindo para o ganho de tenacidade do material (Quinino, 2015).

A adoção de concreto com fibras híbridas, contudo, exige cuidados específicos no projeto e na dosagem. Segundo o livro de Ehrenbring e Tutikian (2023), a dosagem ideal deve considerar não apenas a proporção volumétrica das fibras, mas também a interação entre elas, o tipo de matriz cimentícia e as condições de aplicação. O comportamento do concreto com fibras híbridas não é simplesmente a soma dos efeitos individuais, mas sim um efeito sinérgico, que deve ser estudado de forma experimental.

Essa sinergia também é evidenciada por Li et al. (2022), que, por meio de modelagens numéricas e ensaios laboratoriais, demonstraram que a dosagem e combinação adequadas das fibras podem aumentar em até 40% a energia absorvida pelo concreto antes da ruptura. O conceito deste material baseia-se, portanto, na sinergia entre materiais distintos, permitindo a atuação em diferentes escalas. Fibras com elevada rigidez e resistência à tração, atuam no controle de fissuração em estágios avançados de carregamento, enquanto fibras mais flexíveis, passam a atuar nas fases iniciais, controlando microfissuras e melhorando o desempenho do concreto quanto à retração plástica (Almeida, 2023; LI et al., 2022).

Desta forma, as fibras exercem diferentes funções conforme sua natureza e características. Restringindo os materiais utilizados na pesquisa, as metálicas, como as de aço, amplamente utilizadas devido à sua capacidade de aumentar significativamente a resistência à tração, à flexão e ao impacto do concreto, proporcionam maior resistência pós fissuração. Além disso, atua como reforço passivo, promovendo o "costuramento" das fissuras após sua formação, o que eleva a tenacidade do compósito e ocasiona uma redistribuição de tensões (Figueiredo, 2011).

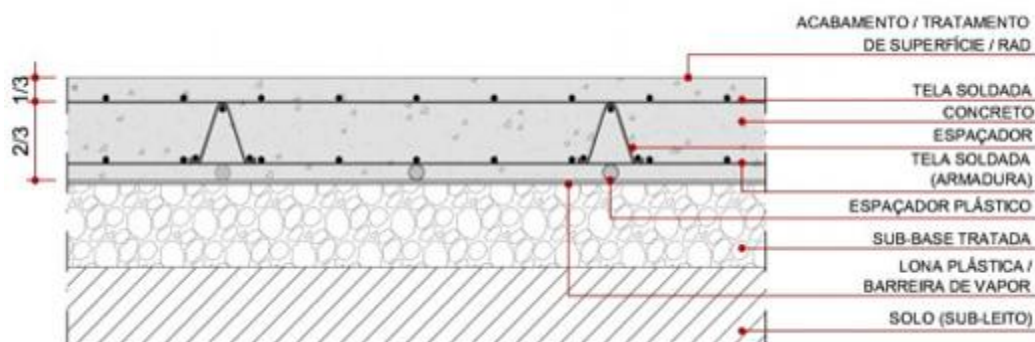
A fibra de polipropileno, por sua vez, se destaca por ser leve e possuir baixo módulo de elasticidade, o que a torna eficiente na prevenção de fissuras plásticas, atuando na microestrutura do material, retardando o aparecimento de trincas iniciais.

Adicionalmente, contribui para a redução da permeabilidade do concreto, o que favorece a durabilidade da estrutura, prolongando sua vida útil (Almeida, 2023; LI et al., 2022).

Já a fibra de carbono é reconhecida por sua alta resistência à tração e baixa densidade, atributos que conferem ao compósito ganhos expressivos em resistência mecânica, rigidez e durabilidade, especialmente em ambientes agressivos, como aqueles sujeitos à ação de cloretos ou variações térmicas intensas. Assim, a escolha e combinação dessas fibras são justificadas pela sinergia entre suas propriedades, que contribuem para melhorar características como propriedades mecânicas e a durabilidade dos compósitos cimentícios (Abreu, 2021; Zhang, Y., et al., 2024).

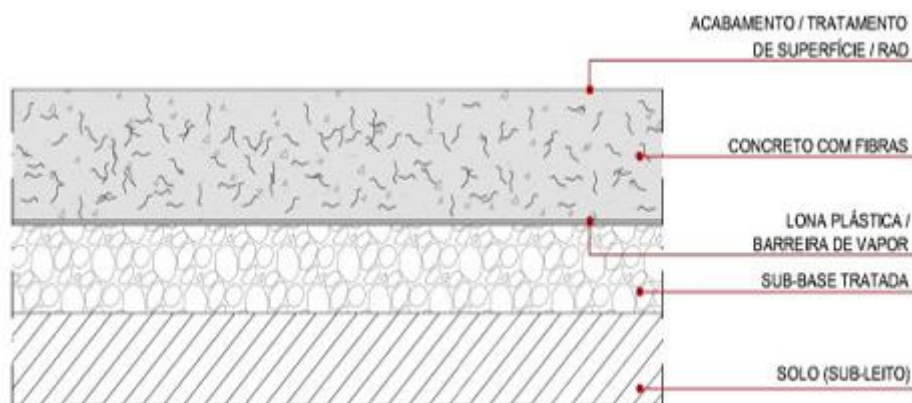
Nas aplicações estruturais, o concreto com fibras híbridas tem sido utilizado em pavimentos e pisos industriais, com ganhos em resistência ao desgaste e ao impacto, em diversos casos substituindo a armadura convencional, como podemos observar nas Figuras 12 e 13.

Figura 12- Pavimento de concreto com armadura distribuída



Fonte: Carvalho (2009)

Figura 13 - Pavimento de concreto com fibras



Fonte: Carvalho (2009)

Também é aplicado em estruturas submersas, onde se exige resistência à corrosão, e em elementos estruturais de alto desempenho, em que há necessidade de aprimoramento das propriedades em relação ao concreto convencional, como já mencionado. Reiterando aos aspectos de durabilidade, o uso de concretos com fibras híbridas se torna muito relevante em estruturas sujeitas a ciclos de congelamento e degelo, ataques químicos e abrasão (desgaste devido ao atrito), atributos necessários nas aplicações citadas. (Albertim, 2016; Li, J., et al., 2021).

Dessa forma, o uso combinado de fibras de aço, polipropileno e carbono representa um avanço relevante na tecnologia dos compósitos cimentícios, promovendo não apenas melhorias no desempenho mecânico, mas também avanços em termos de durabilidade e sustentabilidade estrutural. A escolha adequada das proporções e tipos de fibras, aliada ao conhecimento das propriedades da matriz cimentícia, é fundamental para a obtenção de resultados eficientes, conforme apontado por Ehrenbring e Tutikian (2023). Assim, é possível projetar diferentes traços, não apenas com estes materiais, mas todos considerando suas propriedades específicas. Para isso, podemos considerar os materiais mais utilizados conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Estudos utilizando fibras híbridas

Autor	Trabalho	Tipo de fibras	Aditivo	Relação A/C
Srinivasa Rao Naraganti – 2020	Artigo	Aço + Polipropileno/ Aço + Sisal	Superplastificante	0,5
Arathi Krishna – 2021	Artigo	Aço + Polipropileno + Sisal	Superplastificante	0,37
Hui Guo – 2020	Artigo	Aço + Polipropileno	Não especificado	0,34
Vahid Afroughsabet – 2015	Artigo	Aço + Polipropileno	Superplastificante	0,33
Fuat Köksal – 2012	Artigo	Aço + Polipropileno	Superplastificante	0,47
Uziel Quinino – 2015	Tese de doutorado	Aço + Polipropileno + Carbono	Superplastificante	0,51 – 0,66

Fonte: Adaptado autor (2025)

Considerando as informações trazidas, observa-se alguns estudos de hibridização das fibras, relacionando a ideia de complemento de propriedades,

abordada anteriormente. Com isso, o objetivo é encontrar uma mistura com características superiores à matriz convencional, ou até a inserção de apenas um tipo de fibras. Desta forma, outro elemento de suma importância é o traço e a proporção de fibras utilizadas pelos autores, apresentada no Tabela 5.

Tabela 5 - Traços e proporções utilizadas pelos autores

Autor	Traço (Cimento/Areia/Brita)	Proporção de fibras
Srinivasa Rao Naraganti – 2020	1 - 1,74 - 3,33	De 0,5% a 1,5%
Arathi Krishna – 2021	1 - 1,70 - 2,74	1% variando entre as fibras
Hui Guo – 2020	1 - 1,13 - 2,10	De 2,12% a 3,22%
Vahid Afroughsabet – 2015	1 - 1,79 - 1,87	1% variando entre as fibras
Fuat Köksal – 2012	1 - 1,97 - 3,24	De 0,9 % a 1,84%
Uziel Quinino – 2015	1 - 2,12 - 2,88 1 - 2,9 - 3,6	De 0,60% a 1,15%

Fonte: Adaptado autor (2025)

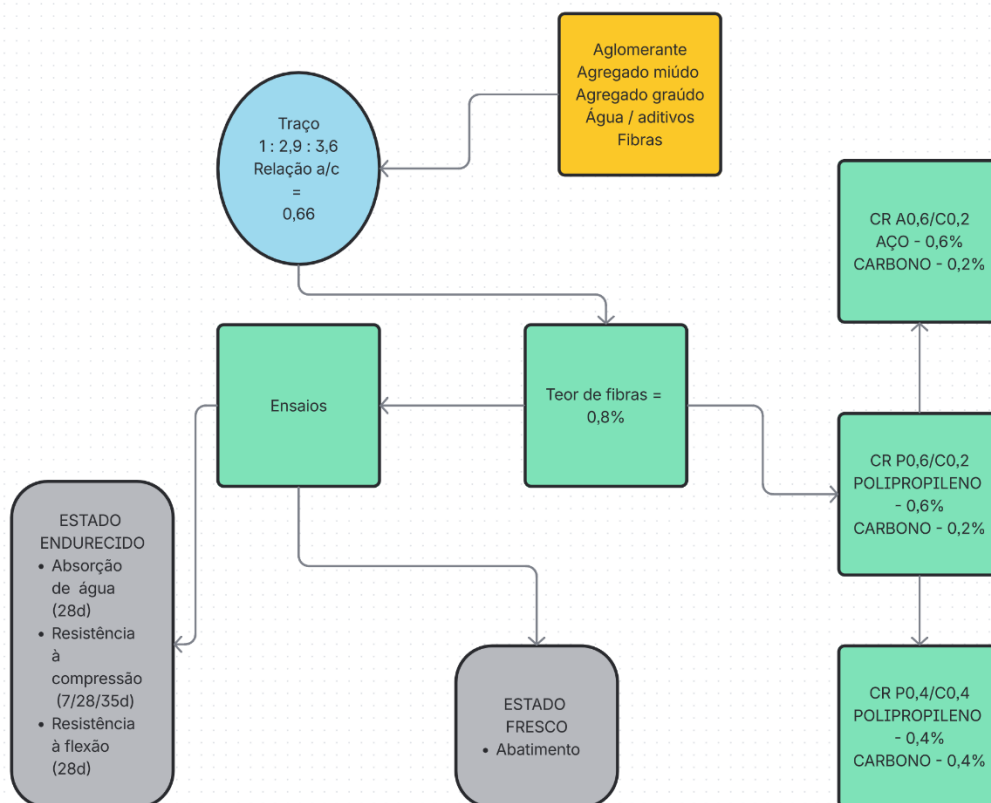
Com base nos exemplos apresentados, somado ao tempo considerado prévio de estudos, pode-se ver que os autores estão ensaiando diferentes fibras híbridas, determinando um traço padrão, ou até mesmo fazendo uma análise apenas do material, não levando em consideração seu traço ou ao menos não especificando. Desta forma, o objetivo principal é encontrar as propriedades e sinergia entre os materiais, evoluindo do aspecto de testes com um tipo apenas de fibras, buscando padrões e características para tornar este material comercial e útil em questões práticas da construção civil.

Para o objeto de estudo, foi utilizado o trabalho de referência do Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino (2015), relacionado às fibras já abordadas no trabalho, como a de aço, polipropileno e carbono, buscando encontrar na mistura o somatório das propriedades apontadas de cada material e, principalmente, relacionando os aspectos de macrofibras e microfibras, apresentadas pela geometria do material.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tem por objetivo verificar, por meio de ensaios e análises, as propriedades do concreto com fibras híbridas, utilizando os materiais já mencionados e variando a combinação de macrofibra e mantendo a microfibra, conforme detalhado no fluxograma, Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma materiais e métodos



Fonte: Autor (2025)

Sendo assim, determinando as propriedades mecânicas e caracterizando o elemento, o estudo irá oferecer subsídios para a formulação e dimensionamento do material em construções civis.

Para os ensaios, conforme previamente abordado no fluxograma, foi avaliado os corpos de prova em algumas idades para cada dosagem, conforme apresenta a Tabela 6, com a quantidade de corpos de prova.

Tabela 6 - Quantidade de ensaios

Ensaio	Abatimento	Absorção de água (28d)	Resistência compressão (7/28/35 d)	Resistência flexão (28 d)
CR A0,6/C0,2	1	3	9	2
CR P0,6/C0,2	1	3	9	2
CR P0,4/C0,4	1	3	9	2
Somatório	3	9	27	6

Fonte: Autor (2025)

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1. Aglomerante

O material aglomerante empregado foi o cimento Portland do tipo CP II-F-40, fornecido pela empresa Fagundes, sua massa específica média é de 3,06 g/cm³. Suas propriedades físicas e químicas estão em conformidade com a norma NBR 12655:2022 – Concreto de cimento portland - preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento (ABNT, 2022).

3.1.2. Agregado Miúdo

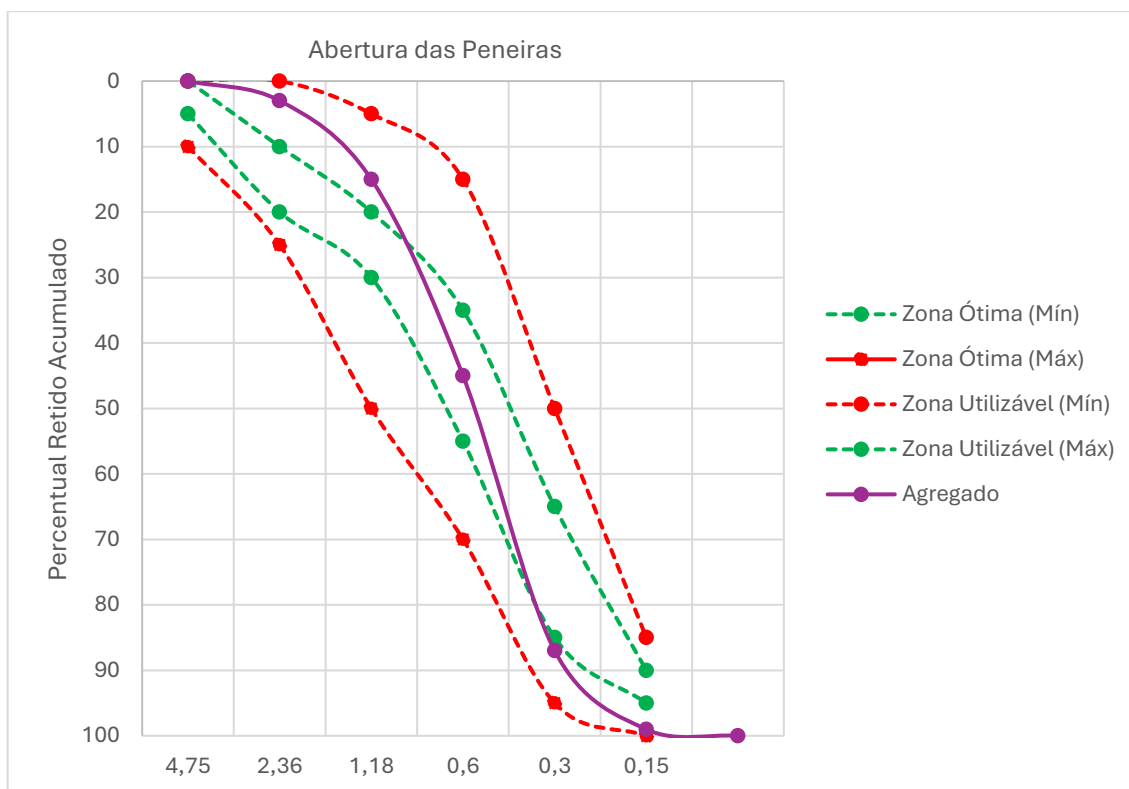
O agregado miúdo empregado apresentou módulo de finura de 2,49, valor que indica uma granulação média, adequada para concretos de uso geral. Sua caracterização física foi realizada conforme os procedimentos da ABNT NBR 16972:2021, obtendo-se massa unitária de 1,70 g/cm³ e diâmetro máximo característico de 4,75 mm, o que confirma sua conformidade com os limites estabelecidos para areias utilizadas em compósitos cimentícios. O ensaio de análise granulométrica foi conduzido segundo as recomendações da ABNT NBR 7211:2022, permitindo determinar a distribuição das partículas e a adequação do material à zona utilizável para concretos estruturais.

Complementarmente, de acordo com a ABNT NBR 16916:2021, determinou-se a massa específica aparente do agregado miúdo em 2,542 g/cm³ e a absorção de água em 1,724%, valores compatíveis com materiais de boa qualidade e baixo teor de impurezas. Esses parâmetros indicam um agregado com comportamento estável

frente à variação de umidade, contribuindo para a manutenção da trabalhabilidade e do desempenho mecânico do concreto.

A caracterização completa do agregado miúdo encontra-se apresentada no Apêndice A, enquanto a curva granulométrica correspondente é exibida na Figura 15, evidenciando a distribuição de partículas e sua adequação às faixas normativas.

Figura 15 – Curva granulométrica da areia



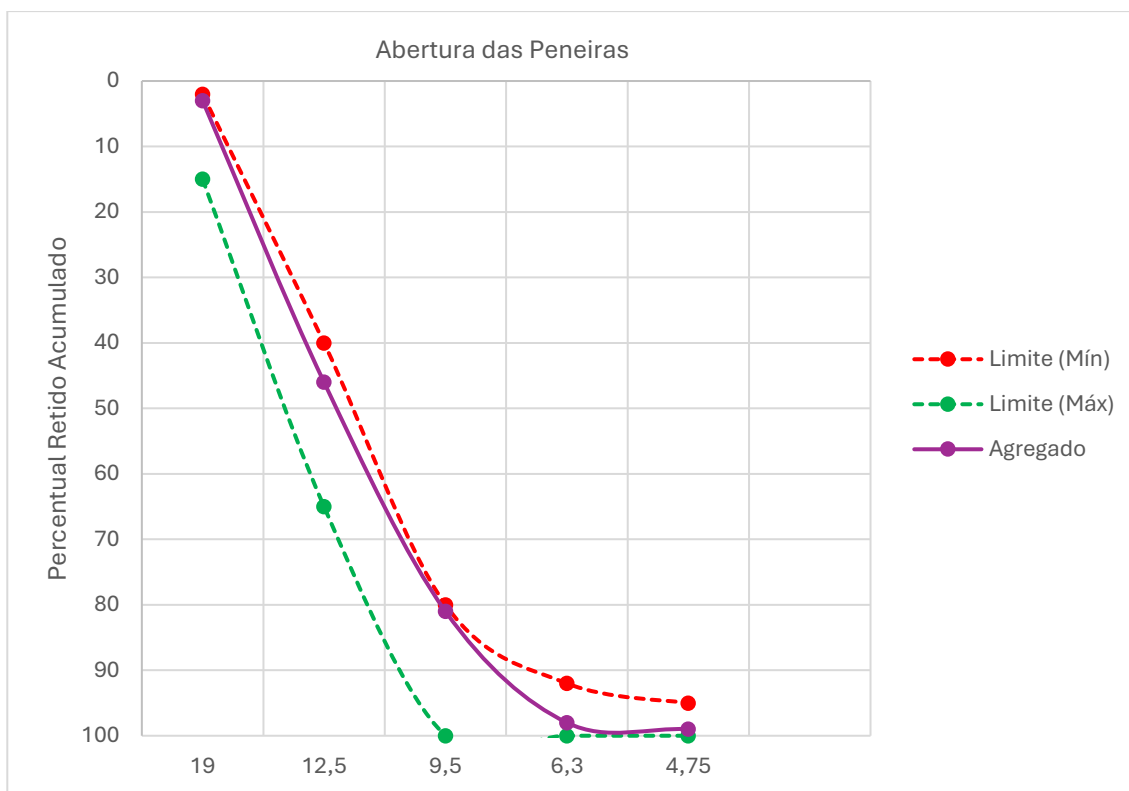
Fonte: Autor (2025)

3.1.3. Agregado Graúdo

O agregado graúdo é de origem basáltica, sua massa unitária baseada na ABNT NBR 16972:2021, possui um valor de $0,74 \text{ g/cm}^3$. A caracterização granulométrica foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2022, suas características podem ser vistas no Apêndice B.

Para o material, baseado na ABNT NBR 16917:2021 a massa específica aparente do material é $2,711 \text{ g/cm}^3$, sua absorção de água é $3,972\%$ e seu diâmetro máximo é de 19 mm. Além disso, seu módulo de finura é de 6,30, no qual, podemos classificar o material como Brita 1. Na Figura 16, observamos a curva granulométrica do material.

Figura 16 - Curva granulométrica da brita



Fonte: Autor (2025)

3.1.4. Aditivo e água

Influenciando na trabalhabilidade da mistura, a água utilizada foi fornecida pela rede de abastecimento da companhia local. Levando em consideração que as fibras impactam na fluidez do concreto, utilizou-se um aditivo superplastificante da empresa Sika, sendo o ViscoCrete -100 HE. Ambos elementos, respeitando a proporção apresentada no traço.

3.1.5. Fibras

Para as fibras utilizadas neste estudo, adotaram-se os comprimentos comerciais fornecidos pelos fabricantes, garantindo que a macrofibra apresentasse comprimento ao menos duas vezes superior ao da microfibra. A fibra de carbono empregada é classificada como microfibra devido ao seu reduzido diâmetro e ao papel que desempenha na matriz cimentícia. Como destacam Bentur e Mindess (2007), a distinção entre micro e macrofibras está mais associada à função estrutural exercida no compósito do que às dimensões geométricas. Microfibras atuam principalmente no

controle da microfissuração, contribuindo para a estabilidade da matriz e para a redução de retrações iniciais (FIGUEIREDO, 2011; NAAMAN, 2007). Nesse contexto, a fibra de carbono apresenta elevado módulo de elasticidade e capacidade de ponte em microescala, justificando sua classificação funcional como microfibras, mesmo quando utilizada com comprimentos superiores a 15 mm. Desta forma, o valor de 20 mm foi selecionado conforme referência técnica indicada e apresentada na Tabela 7.

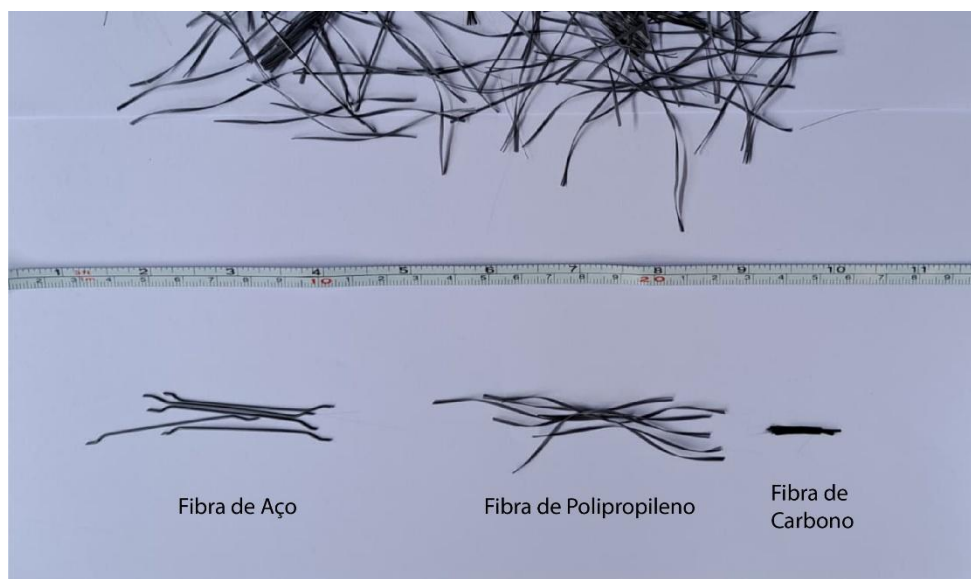
Tabela 7 - Dados fornecidos das fibras

Fibra	Comprimento	Diâmetro	Módulo de elasticidade	Densidade
Aço	50 mm	0,75 mm	210 GPa	7,8 g/cm ³
Polipropileno	50 mm	0,96 mm	9 GPa	0,91 g/cm ³
Carbono	20 mm	0,007 µm	250 GPa	1,78 g/cm ³

Fonte: Autor (2025)

As fibras metálicas utilizadas neste estudo são fornecidas pela empresa Maccaferri, sendo produzidas a partir de fios de aço treilados. As macrofibras de polipropileno, por sua vez, são fabricadas pela Weber Saint-Gobain e comercializadas sob a marca Quartzolit, classificadas como fibras sintéticas corrugadas para uso em concretos. Essas fibras correspondem à classe II da norma EN 14889-2:2006 e são produzidas conforme os requisitos da ISO 9001:2008, consistindo em monofilamentos sintéticos obtidos por extrusão, seguidos pelos processos de ondulação e corte. Já os filamentos de fibras de carbono empregados na pesquisa foram extraídos do tecido M.Brace CF 130. Conforme ilustrado na Figura 17, com as fibras citadas.

Figura 17 - Fibras utilizadas



Fonte: Autor (2025)

3.2. PRODUÇÃO DO CONCRETO

Todo o concreto utilizado foi produzido em laboratório, a dosagem dos materiais foi realizada em massa, e a mistura ocorreu mecanicamente, com o auxílio de uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 192 litros. O traço adotado, levando em consideração o trabalho de Quinino (2015), apresentou as seguintes proporções em massa: 1 : 2,9 : 3,6 (cimento Portland CP II -F-40: agregado miúdo: agregado graúdo granítico), com relação água/cimento de 0,66. Para ajustes de trabalhabilidade, optou-se pela utilização de um aditivo plastificante. A dosagem foi determinada de forma a proporcionar abatimento do tronco de cone entre 150 ± 10 mm, sem alterar a relação água/cimento, mantendo-se um teor de 1,75% em massa de cimento.

A dosagem de fibras foi definida a partir da relação massa da mistura para o traço CR A0,6/C0,2, considerando o respectivo teor de fibras estipulado. Nos demais traços, a incorporação das macrofibras foi realizada com base em uma relação volumétrica levando em consideração a massa específica do aço e do polipropileno, estipulando o teor final de 0,8% de fibras na mistura. Esse procedimento permitiu calcular a quantidade adequada de fibras a ser adicionada em cada composição, resultando nos valores apresentados na Tabela 8, com o consumo de materiais para 1 m³ de concreto, tendo a referência do trabalho do Quinino (2015).

Tabela 8 – Consumo de materiais para 1m³ de concreto

Material	CR A0,6/C0,2 (kg)	CR P0,6/C0,2 (kg)	CR P0,4/C0,4 (kg)
Cimento	294	294	294
Areia	852,6	852,6	852,6
Brita	1.058,4	1.058,4	1.058,4
Água	194	194	194
Aditivo	-	-	-
Fibra de Aço	14,39	-	-
Fibra de Polipropileno	-	2,04	1,20
Macro			
Fibra de Carbono	4,79	4,79	9,59
Teor de fibras	0,8%	0,8%	0,8%

Fonte: Autor (2025)

Vale ressaltar que este trabalho tem como objetivo utilizar o traço e as proporções indicadas por Quinino (2015), a fim de investigar uma nova combinação de fibras híbridas. A proposta consiste em substituir a fibra de aço utilizada no estudo original por outras fibras, buscando manter, ou até melhorar, as propriedades mecânicas avaliadas nos ensaios, especialmente no que se refere ao desempenho do concreto reforçado.

Para as moldagens, seguindo as recomendações da NBR 5738:1984 – Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto, o lançamento do concreto nas formas foi realizado em duas etapas. Na primeira, a forma foi preenchida até a metade de seu volume, realizando-se em seguida o adensamento manual, sendo 36 golpes no caso dos cilíndricos e 70 golpes nos prismáticos.

Após o adensamento da primeira camada, foi lançado o restante do volume de concreto, seguido de novo processo de adensamento até o completo preenchimento das formas. Os corpos de prova permaneceram moldados em suas formas por um período de 72 horas. Decorrido esse tempo, foram desmoldados e imediatamente acondicionados em meio úmido, a fim de reduzir os efeitos da retração plástica causada pela evaporação da água de amassamento nas primeiras horas, especialmente em função da ação direta do calor ou do vento.

Com o objetivo de assegurar a qualidade do concreto e garantir uma cura eficiente, os corpos de prova endurecidos foram transferidos para uma câmara úmida, mantida a 25 °C e com 90% de umidade relativa. Para a análise da evolução das propriedades mecânicas ao longo do tempo, foram moldados alguns corpos de prova para cada tipo de ensaio, sendo ensaiados nas idades de 7, 28 e até 35 dias, conforme apresentado anteriormente.

3.3. ENSAIOS

3.3.1. Abatimento

A determinação da consistência do concreto no estado fresco é essencial para avaliar sua trabalhabilidade, sendo um dos principais parâmetros para o controle tecnológico em obras e pesquisas. Essa verificação é realizada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme estabelece a norma ABNT NBR NM 67:1998 – “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”. Tal ensaio é aplicável a concretos plásticos e coesivos que apresentem um

valor de abatimento igual ou superior a 100 mm, para o trabalho, a relação é 150 ± 10 mm.

Desta forma, estabelece uma estimativa indireta da fluidez do concreto, permitindo avaliar sua capacidade de preenchimento das formas e envolvimento das fibras. Em aplicações práticas com compósitos cimentícios, esse ensaio é amplamente utilizado para garantir a consistência adequada à aplicação desejada. Mesmo quando há adição de fibras à matriz cimentícia, o que geralmente reduz a fluidez da mistura, tornando-a mais seca e rígida, o ensaio continua sendo viável, especialmente quando há o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes que restabelecem a trabalhabilidade necessária.

De acordo com a ABNT NBR NM 67:1998, o equipamento utilizado no ensaio de abatimento é composto por:

- a) um molde em forma de tronco de cone metálico, com bases paralelas e abertas, sendo a base inferior com diâmetro de 200 mm e a superior com 100 mm, e altura de 300 mm;
- b) uma haste de compactação de seção circular, com extremidades arredondadas e dimensões padronizadas;
- c) uma placa rígida e plana que serve como base para apoio do molde durante o ensaio.

Itens observados conforme Figura 18:

Figura 18 - Ensaio de abatimento



O procedimento consiste inicialmente em posicionar o molde metálico sobre a placa base e preenchê-lo com concreto fresco em três camadas de volumes aproximadamente iguais. Cada camada deve ser adensada com 25 golpes da haste de compactação, distribuídos uniformemente sobre toda a superfície da camada. Após o preenchimento e o nivelamento do topo do molde, este é cuidadosamente levantado na vertical, em um movimento contínuo e sem impactos, em um intervalo de tempo de 5 a 10 segundos. Com a remoção do molde, o concreto tende a sofrer uma deformação vertical, denominado abatimento. Esse valor é obtido subtraindo-se a altura do molde metálico da altura média do corpo de prova de concreto desmoldado. O resultado, dado em milímetros, representa o grau de consistência do concreto.

3.3.2. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão é de suma importância para a avaliação da durabilidade de concretos reforçados com fibras híbridas, pois permite determinar a capacidade do material em absorver água quando totalmente submerso, refletindo diretamente sua porosidade e a qualidade da matriz cimentícia. De acordo com a ABNT NBR 9778:2005 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, o ensaio fornece parâmetros fundamentais para compreender o comportamento do concreto frente à penetração de agentes agressivos, como cloretos e sulfatos, que podem comprometer a integridade e a vida útil das estruturas.

No caso de concretos com fibras híbridas, como aço, polipropileno e carbono, a análise da absorção de água é ainda mais relevante, pois a presença e a distribuição das fibras podem influenciar na formação e na interação dos poros, contribuindo para a redução da permeabilidade e o aprimoramento a durabilidade do compósito.

Os corpos de prova cilíndricos, foram secos em estufa até massa constante, posteriormente, submerso a água por 72 horas. A Equação 1 do ensaio conforme a normativa é expressa em g/cm^2 , sendo:

$$A = \frac{msat - ms}{ms} \times 100$$

Onde:

A = absorção de água (g/cm^2)

msat = massa da amostra saturada (g)

ms = massa da amostra seca (g)

A análise dos resultados permite avaliar a eficiência das fibras na redução da absorção de água por imersão e, conseqüentemente, na melhoria da resistência do concreto à penetração de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos. Dessa forma, o ensaio de absorção de água por imersão, conforme a ABNT NBR 9778:2005, é fundamental para complementar a caracterização da durabilidade de concretos reforçados com fibras, especialmente em situações em que o material permanece em contato direto ou prolongado com a água, permitindo avaliar a qualidade da matriz cimentícia e a influência das fibras na redução da porosidade e da permeabilidade do compósito.

3.3.3. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é um dos principais parâmetros utilizados para avaliar o desempenho mecânico de compósitos cimentícios, como o concreto com adição de fibras híbridas. Esse ensaio fornece um valor de referência que permite a comparação entre diferentes composições de concreto, além de servir como critério técnico para o dimensionamento estrutural e controle tecnológico em obras.

A execução do ensaio segue as diretrizes da norma brasileira NBR 5739:2018: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018), que estabelece os procedimentos para determinação da resistência à compressão simples. Esse ensaio é de fundamental importância, pois permite verificar a eficiência da matriz cimentícia e o impacto da adição de fibras na resistência do compósito, especialmente em aplicações estruturais e pisos industriais.

Os corpos de prova foram extraídos a partir de moldagens em laboratório. Para o adensamento do concreto, a colocação da mistura nos moldes foi dividida em duas camadas, cada uma adensada com um soquete metálico de seção circular, aplicando 12 golpes distribuídos uniformemente em toda a superfície. O soquete penetrou levemente na camada anterior para garantir a ligação entre elas. Após a moldagem, os CP's foram curados adequadamente e ensaiados aos 7, 28 e 35 dias de idade, utilizando uma prensa EMIC, Célula de 2000, aplicando uma velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa, que aplica a carga axial de forma contínua até a ruptura do material.

Nesta pesquisa, foram adotados corpos de prova cilíndricos com 190 mm de altura e 95 mm de diâmetro, mantendo-se a relação altura/diâmetro igual a 2:1, conforme recomendação normativa. Essa proporção é essencial para garantir que a

falha ocorra por compressão pura, minimizando o efeito de flambagem e garantindo resultados representativos, conforme apresenta a Figura 19.

Figura 19 - Medidas do corpo de prova



Fonte: Autor (2025)

O ensaio foi realizado com uma amostragem mínima de três corpos de prova por idade, garantindo a reprodutibilidade dos resultados. A carga máxima suportada por cada corpo de prova foi registrada, sendo a resistência à compressão calculada pela razão entre essa carga e a área da seção transversal do cilindro.

3.3.4. Resistência à flexão

O ensaio de flexão é amplamente utilizado para avaliar o desempenho mecânico de concretos reforçados com fibras. Esse tipo de ensaio permite observar a contribuição das fibras na melhoria da ductilidade e da tenacidade do material, aspectos que não são adequadamente evidenciados por análises de compressão ou de tração direta.

Para o ensaio de resistência à flexão, realizado aos 28 dias, foram utilizados dois corpos de prova prismáticos com dimensões de 150 × 150 mm de seção transversal e 500 mm de comprimento. Tendo a referência do trabalho de Tamer Birol, 2025, o procedimento adaptou a dimensão do corpo de prova perante as orientações da norma RILEM TC 162 – TDF e na ABNT NBR 16940:2021, que estabelecem a aplicação de carga em três pontos, sendo o corpo de prova apoiado em dois roletes

inferiores e submetido a carregamento central na parte superior. O ensaio foi conduzido em uma prensa EMIC, célula de carga de 2000, com velocidade de aplicação de carga controlada de $0,45 \pm 0,15$ MPa, conforme especificado pela norma. A Figura 20 ilustra o arranjo experimental adotado.

Figura 20 - Ensaio da flexão



Fonte: Autor (2025)

É importante que o comprimento do vão seja, no mínimo, três vezes maior que o comprimento da fibra, assegurando uma adequada dispersão e atuação das fibras ao longo da zona tracionada durante o ensaio. Essa proporção contribui para que o reforço fibroso desempenhe de forma eficiente sua função de controlar a fissuração e aumentar a tenacidade do concreto. Além disso, a geometria adotada para os corpos de prova possibilita uma avaliação precisa da contribuição das fibras no comportamento pós-fissuração, ao mesmo tempo em que facilita o processo de moldagem e instrumentação. A resistência à flexão foi determinada pela EN 14651:2007, derivada da normativa RILEM TC 162 – TDF, pela seguinte Equação 2:

$$Fr = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Onde:

F = carga máxima (N);

L = vão livre (mm);

b = largura da seção (mm);

h = altura da seção (mm).

3.3.4.1 Tenacidade pelo CMOD e ductilidade

A tenacidade do concreto representa a capacidade do material em absorver energia até o ponto de ruptura, refletindo diretamente sua ductilidade e desempenho pós-fissuração. A determinação desta propriedade permite avaliar a eficiência do reforço proporcionado pelas fibras, que atuam no controle da propagação das fissuras e na redistribuição de tensões após a fissuração da matriz cimentícia. Para este estudo, adaptou-se o procedimento descrito na norma ABNT NBR 16940:2021.

A aplicação desse ensaio é essencial para validar o uso de fibras como substituição parcial ou total das armaduras convencionais, especialmente em pisos industriais e elementos estruturais sujeitos a esforços de flexão. Sendo um complemento ao ensaio de resistência à flexão. Além disso, o registro da relação carga x deslocamento x tempo durante o carregamento possibilita a construção da curva de tenacidade, a partir da qual se obtém a energia absorvida pelo material. Essa metodologia oferece uma avaliação abrangente do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras, englobando tanto sua resistência inicial quanto sua capacidade residual após a formação das fissuras.

A norma brasileira estabelece que, a altura e largura do corpo de prova prismático deve ser de 150 mm e o comprimento entre 550 mm e 700mm, porém devido a limitações do laboratório, utilizamos o CP de 150 x 150 mm e 500 mm de comprimento. A normativa segue as considerações do ensaio a flexão, com a aplicação de carga em três pontos, sendo o corpo de prova apoiado em dois roletes inferiores e submetido a carregamento central na parte superior. Ademais, vale ressaltar que, para o direcionamento da fissura, foi utilizado um entalhe, cortado com uma esmerilhadeira, com disco diamantado para concreto, resultando em uma abertura de 3 mm de largura e 2,5 cm de altura, conforme indicada pela EN 14651:2007.

A partir da execução do ensaio, foi traçado um gráfico, carga x deslocamento x tempo, com a qual, é possível determinar a energia absorvida pelo compósito. Para isso, torna-se necessário monitorar com precisão o deslocamento da viga na zona de atuação da carga, a qual, foi realizada a partir de filmagens, sincronizadas do ensaio, conforme Figura 21.

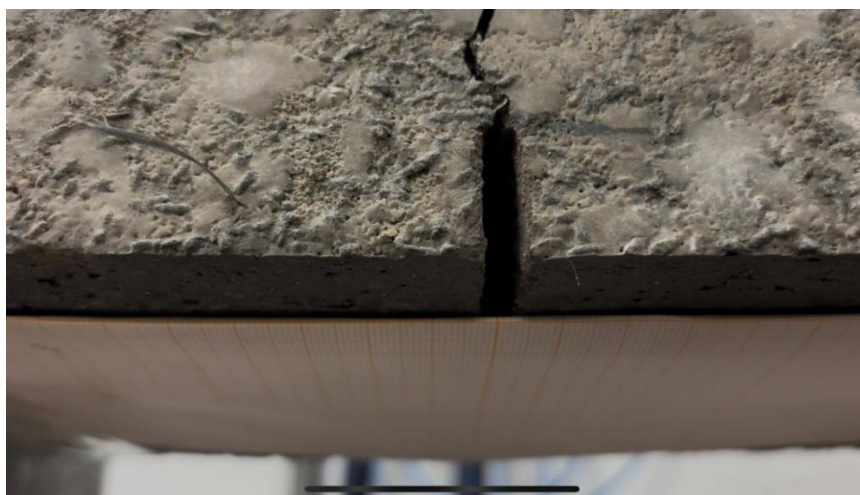
Figura 21 – Configuração do ensaio



Fonte: Autor (2025)

Desta forma, conforme utilizado por Birol (2025), adicionou-se uma folha de papel milimetrado na parte inferior do corpo de prova, com uma fixação em uma das extremidades da viga, evitando interferência de eventuais movimentações indesejadas, deixando a outra sem interferências. Para a obtenção dos resultados, foi realizado um vídeo sobre a parte inferior do material, além de outra gravação mostrando a carga exercida pela prensa, apresentado no visor do equipamento. Com isso, e somado a sincronia entre os vídeos, obtemos os parâmetros de abertura de fissura, carga exercida pela prensa e o tempo de cada abertura com sua carga pontual, elementos fundamentais para os resultados propostos. Estas adaptações podem ser visualizadas conforme Figura 22.

Figura 22 – Adaptação para ensaio



Fonte: Autor (2025)

4. RESULTADOS

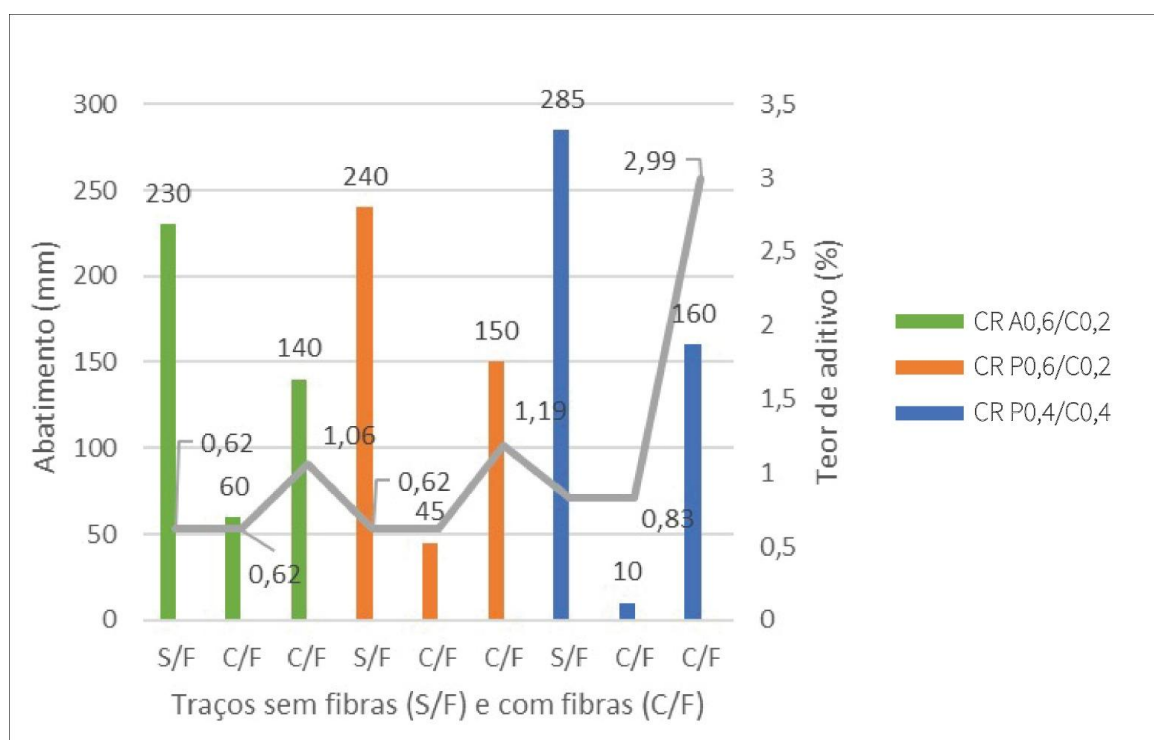
Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados com os diferentes traços de concreto reforçado com fibras híbridas. As análises englobam as propriedades no estado fresco e endurecido, permitindo avaliar de forma comparativa o desempenho das combinações de fibras quanto à trabalhabilidade, absorção de água, resistência à compressão e comportamento à tração na flexão, bem como a tenacidade e ductilidade.

4.1 ABATIMENTO

As propriedades do concreto fresco foram avaliadas por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, realizado em duas etapas: a primeira antes da adição das fibras e a segunda após sua incorporação, já com o uso do aditivo superplastificante. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice C, acompanhados das respectivas observações sobre as misturas e da indicação da quantidade de aditivo necessária para ajuste do traço após a inserção das fibras.

A partir dos dados do Apêndice informado, verificou-se que, como esperado, a adição de fibras provocou uma redução no abatimento do tronco de cone, apontado também, na Figura 23.

Figura 23 – Resultado do ensaio de abatimento



Fonte: Autor (2025)

Quando observamos o traço CR A0,6/C0,2, analisamos uma redução de 73,9% quando adicionada a fibra na mistura, para o traço CR P0,6/C0,2, essa redução é de 81,25%, já para o CR P0,4/C0,4, a presença da fibra é ainda mais influente na mistura, reduzindo o abatimento em 96,5%, sendo o traço mais prejudicado quanto a fluidez do compósito.

Para o ajuste da trabalhabilidade foi necessário o acréscimo do aditivo, tendo influência direta no concreto, causando característica de exsudação, conforme apresenta as Figuras 24 e 25. Ressalta-se ainda que, de acordo com o referencial deste estudo, quanto maior o teor de fibras incorporado à mistura, maior tende a ser a influência desses fatores nas propriedades do concreto.

Figura 24 - Exsudação CR P0,6/C0,2 Figura 25 - Exsudação CR P0,4/C0,4



Fonte: Autor (2025)

O aditivo utilizado, tem uma recomendação de 0,3% a 2%, relacionando o valor de aglomerante. Para o CR A0,6/C0,2 e CR P0,6/C0,2, foi mantido o valor proposto pelo fabricante, mas para o traço CR P0,4/C0,4, utilizou-se um teor maior que o recomendado.

Já para o CR P0,6/C0,2, com uma macrofibra polimérica, necessitou de uma adição superior de aditivo, comparado ao traço anterior, e desta forma, como foi mantido o teor de microfibras de carbono, resultou em uma exsudação mais agressiva, mesmo utilizando um teor recomendado do superplastificante.

Levando em consideração o traço CR P0,4/C0,4, que apresentou um maior teor de microfibras, observa-se que, mesmo com a maior dosagem de aditivo, acima do

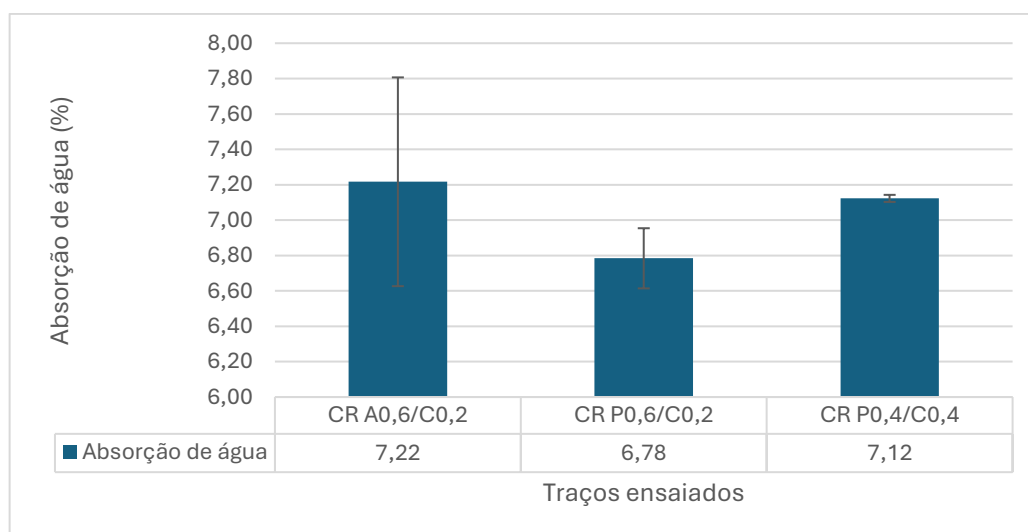
valor recomendado, foi o traço que registrou a menor exsudação entre os analisados. Esse comportamento pode ser atribuído à presença das fibras de carbono, que desempenham papel fundamental na mitigação deste comportamento, devido à sua capacidade de absorver parte da água da mistura e de melhorar a coesão da matriz cimentícia.

Desta forma, conforme apresentado no referencial bibliográfico (Guimarães, 2015; Figueiredo, 2011; Leite 2018; Mehta; Monteiro, 2014), é fundamental o uso de aditivos para mantermos a relação água cimento da mistura. No primeiro traço ensaiado, com uma macrofibra metálica e uma microfibra de carbono, percebe-se um impacto menor em relação aos outros traços propostos quanto a fluidez do CRF. Vale ressaltar, que mesmo com uma relação menor de aditivo, a mistura apresentou aspectos de exsudação, tendo o teor de microfibras pequeno e incapaz de reduzir esse comportamento.

4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os ensaios de absorção de água por imersão foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho de cada traço, analisando seu comportamento, com sua proporção e diferentes fibras. Para isso, aos 28 dias, os corpos de prova foram inseridos na estufa por 72 horas, sendo retirados e pesados. Após isso, foram submersos a água pelo mesmo tempo, finalizando a pesagem das amostras, obtendo resultados ilustrado no Apêndice D, a partir desses dados, determinou-se o a média de cada traço, o que pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Absorção de água média



Fonte: Autor (2025)

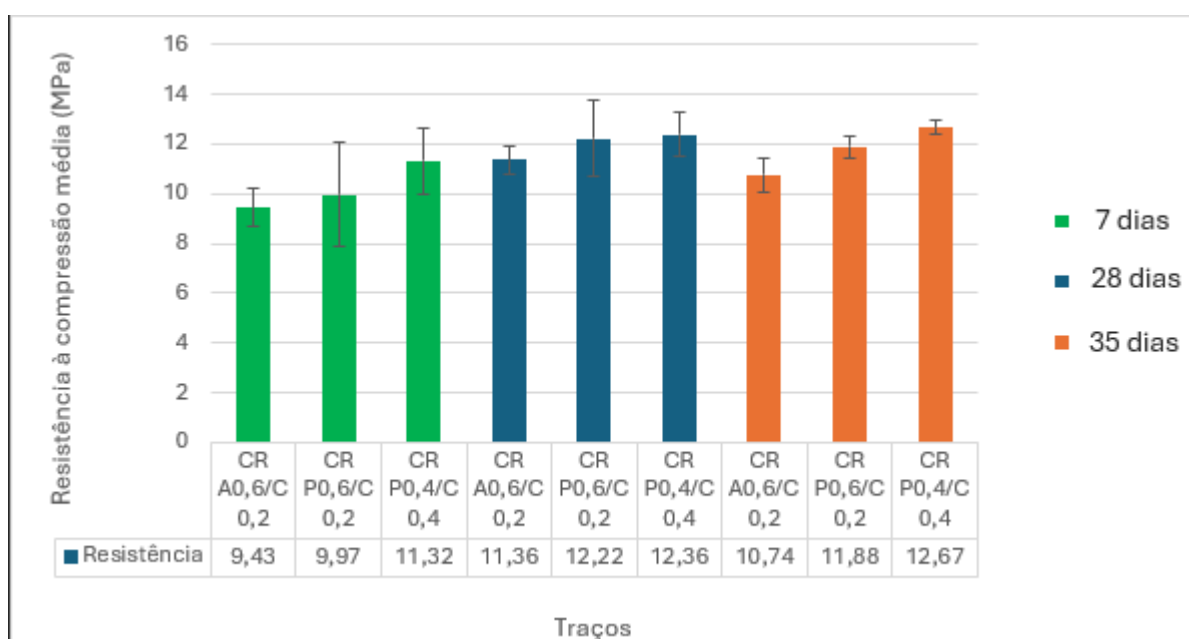
Conforme Figura 26, o traço CR P0,6/C0,2 apresenta o melhor comportamento para o compósito, tendo em comparação ao CR A0,6/C0,2 uma redução de 6,49% de absorção, e em relação ao CR P0,40/C0,40, uma redução de 5,02%. De modo geral, verificou-se que a composição e a proporção das fibras híbridas exercem influência direta sobre a permeabilidade do concreto, sendo o equilíbrio entre fibras um fator determinante para a melhoria do concreto na durabilidade do material.

Os resultados deste estudo para a absorção de água por imersão estão alinhados com tendências observadas na literatura para concretos com fibras híbridas. Ramalingam et al. (2024) analisaram um compósito contendo 1,0% de fibras híbridas (0,75% de aço e 0,25% de polipropileno) e observaram absorções elevadas em razão da combinação entre fibras metálicas e sintéticas. Comparando-se a esse referencial, os valores obtidos neste trabalho, mesmo com um teor total de fibras menor (0,80%), mostraram-se compatíveis com a ordem de grandeza registrada em pesquisas semelhantes, confirmando que o comportamento observado segue o esperado para compósitos reforçados com macro e microfibras.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados apresentados foram organizados por seus traços e idades, conforme apontado pelo Apêndice E. Complementando a análise apresentada pela tabela, podemos verificar os resultados médios para os traços através da Figura 27.

Figura 27 – Resistência à compressão média



Fonte: Autor (2025)

Com base na figura, podemos observar que o melhor desempenho foi obtido com a combinação de 50% de fibras de polipropileno e 50% de fibras de carbono. A incorporação de fibras de carbono, presente em todas as misturas, se mostrou influente na resistência, visto que aumentando sua participação no traço, causou o aumento de resistência. Comparando os resultados de 7 dias, a mistura foi superior ao traço CR P0,6/C0,2 em 11,93% e ao CR A0,6/C0,2 em 16,69%, diferença considerada relevante para o ensaio.

Quando observamos o ensaio aos 28 dias, reduzimos a diferença para o segundo traço em 1,13%, valor aceitável para a resistência, e para o último traço apresentado anteriormente, em 8,09%, resultado mais próximo em comparação aos 7 dias, mas ainda elevado para o ensaio de resistência a compressão. Analisando cada traço, o CR A0,6/C0,2, obteve um aumento de 20,47% em relação a primeira idade, para o CR P0,6/C0,2, o aumento foi de 22,57% e para o CR P0,4/C0,4, foi de 11,93%.

Contudo, analisando os resultados aos 35 dias, podemos observar um grande desvio padrão em alguns traços, algo que pode interferir diretamente nos resultados. Levando como tendência, assim como o CR P0,4/C0,4, os demais compósitos deveriam obter um ganho de resistência na idade avançada, algo que não aconteceu nos traços CR A0,6/C0,2 e CR P0,6/C0,2, tendo eles, os corpos de prova com os maiores índices de desvio padrão. Visto isso, a aleatoriedade da disposição das fibras na mistura, é atrelada como justificativa para este comportamento.

De modo geral, o concreto com fibras produzido não é um compósito estrutural, tendo o desempenho mais eficiente associado ao equilíbrio entre macrofibras e microfibras. A relação de resistência pode estar atrelada com a redução do volume de fibras ao corpo de prova, ou, até mesmo, da resistência individual de cada fibra incorporada a mistura.

Outro comportamento fundamental para a aderência do material na prática da construção civil é a capacidade do concreto em atingir uma resistência mínima nas primeiras idades. Nos traços analisados, observou-se que, em média, aos 7 dias os compósitos já atingiram cerca de 81,5% da resistência final, demonstrando uma evolução significativa do processo de hidratação e da formação da microestrutura do cimento.

Esse ganho precoce de resistência pode estar associado à boa dispersão das fibras e ao efeito sinérgico entre os diferentes tipos empregados. Assim, o comportamento observado reforça a eficiência do uso de fibras híbridas na obtenção de concretos com desenvolvimento acelerado de resistência, aspecto essencial em obras que demandam rápida desforma, liberação antecipada de carga ou elevada durabilidade em serviço.

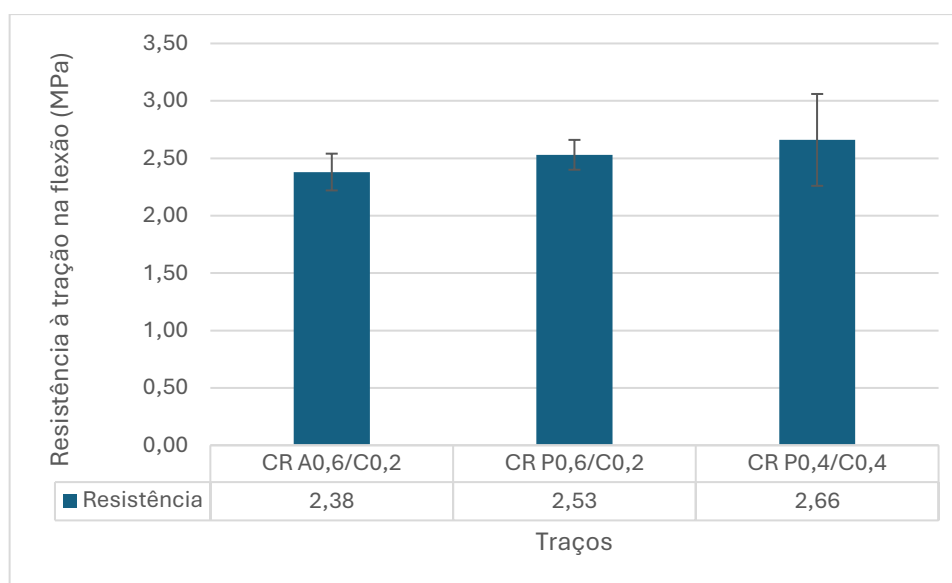
Com base no estudo de Ribeiro (2024), que avaliou um teor de fibras semelhante ao adotado neste trabalho por meio da hibridização entre polipropileno e fibra de vidro aos 28 dias, observou-se uma redução de aproximadamente 27% na resistência à compressão em comparação ao traço sem fibras, obtendo valores próximos aos apresentados no trabalho. Resultados semelhantes também foram reportados por Krishna et al. (2021), que analisaram concretos reforçados com fibras híbridas compostas por aço, polipropileno e sisal e igualmente identificaram reduções na resistência à compressão em relação ao concreto sem fibras. Essas evidências reforçam que variações na natureza das fibras utilizadas, nas características da matriz e na maior exsudação observada nos traços aqui desenvolvidos podem justificar a intensidade da perda de resistência registrada nesta pesquisa, mantendo, contudo, coerência com o padrão observado em diferentes estudos.

4.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Para a resistência à flexão, a adição de fibras contribui para a melhoria do desempenho do compósito. Utilizando a prensa citada nos métodos, o ensaio foi realizado a partir de corpos prismáticos, concretados com o cuidado de reduzir efeitos de alinhamento e aglomeração das fibras. Em cada traço, foram realizados 2 corpos de prova, possibilitando uma verificação de possível falha na dispersão do material, conforme apontado pelo Apêndice F.

Dando continuidade à análise apresentada na tabela, é possível observar, de acordo com os parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas, os resultados válidos para os diferentes traços representados na Figura 28. A partir dessa comparação com o traço de referência, sem adição de fibras, proposto por Quinino (2015), torna-se viável avaliar de forma mais precisa o impacto da incorporação das fibras no desempenho do compósito cimentício.

Figura 28 – Resistência à flexão considerada



Fonte: Autor (2025)

Verifica-se um aumento expressivo na resistência à flexão em todos os traços contendo fibras, quando comparados ao concreto sem fibras produzido por Quinino (2015), com o mesmo traço, apresentando valor de 0,742 MPa. Abordando outra referência, para o ensaio de flexão em três pontos, ainda que as dimensões do corpo de prova adotado neste estudo ($150 \times 150 \times 500$ mm) apresentam pequena variação em relação às vigas utilizadas por Xiong, Xia e Liu (2014) ($150 \times 150 \times 550$ mm), os resultados se mostram comparáveis. Os autores, avaliando um teor de fibras híbridas semelhante ao empregado aqui, mas com a combinação de fibras de aço e polipropileno, reportaram uma tensão equivalente residual de 2,83 MPa, valor compatível com aquele obtido nesta pesquisa. Além disso, o estudo evidencia que a hibridização de fibras proporciona incremento significativo na resistência à flexão em relação ao concreto sem fibras, corroborando o comportamento observado no presente trabalho.

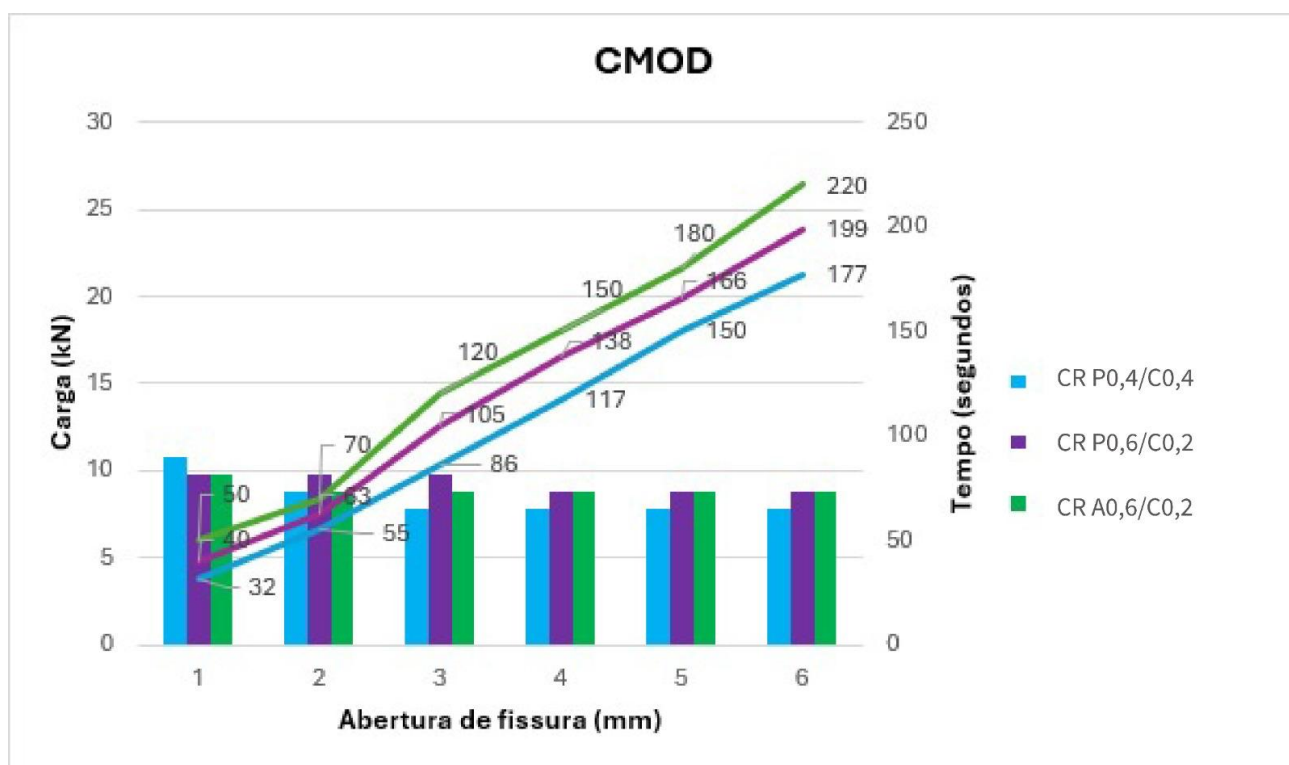
O traço CR P0,4/C0,4, composto por uma proporção equilibrada de 50% de fibras de polipropileno e 50% de fibras de carbono, apresentou o melhor desempenho, alcançando 11,97 MPa, valor que representa um incremento de aproximadamente 285,4% em relação ao concreto sem reforço fibroso, com o valor de 3,34 MPa. Tomando esse traço como referência de desempenho máximo, observou-se que o CR P0,6/C0,2 atingiu 11,38 MPa, o que corresponde a uma redução de cerca de 4,9%, enquanto o CR A0,6/C0,2 apresentou 10,71 MPa, registrando uma queda aproximada

de 10,5%. Esses resultados evidenciam que a composição balanceada entre fibras de polipropileno e carbono proporcionou maior eficiência na transferência de tensões.

4.4.1 Tenacidade pelo CMOD e ductilidade

A determinação da tenacidade foi realizada com base na adaptação dos procedimentos descritos na norma ABNT NBR 16940:2021. Foi gerado um gráfico representando a relação entre o tempo, carga aplicada e a abertura da fissura no corpo de prova. Esses parâmetros permitem avaliar o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado, possibilitando a análise do desempenho em função do tempo de aplicação da carga necessário para a abertura da fissura inicial, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – CMOD



Fonte: Autor (2025)

No traço CR A0,6/C0,2, embora a carga máxima atingida tenha sido de 17,65 kN, valor inferior aos demais traços avaliados, observou-se o melhor desempenho no controle da resistência pós-fissuração. Com um tempo médio de 41 segundos com a carga estável sendo aplicada no corpo de prova para o aumento da fissura, a fibra de aço se mostrou eficiente para o desempenho da tenacidade do compósito. Destaca-se ainda que, mesmo com uma abertura de fissura superior a 6 mm, o corpo de prova

permaneceu parcialmente íntegro e sem sinais de colapso total, demonstrando a capacidade de redistribuição de tensões proporcionada pela presença das fibras.

Para o traço CR P0,6/C0,2, com uma carga máxima de 18,63 kN, apresenta um controle de resistência pós-fissuração intermediário. Com um tempo médio de 32 segundos com a carga estável sendo aplicada no corpo de prova para o aumento da fissura. Vale ressaltar, que o compósito também não teve seu colapso mesmo após a abertura de 6 mm, entretanto, já possuía sinais de comprometimento da estrutura, validando um bom desempenho de tenacidade, mas inferior ao primeiro traço mencionado.

Com base no gráfico apresentado, para o último traço, com uma carga máxima de 19,61 kN, o traço apresentou o pior comportamento relacionado a tenacidade, mesmo tendo a maior carga para rompimento inicial do corpo de prova. Com um tempo médio de 29 segundos com a carga estável sendo aplicada no corpo de prova para o aumento da fissura. Pondera-se que o compósito teve seu colapso após a abertura de fissura de 6 mm, algo que se mostra eficiente comparado ao traço sem fibras, mas inferior aos demais ensaiados.

Ao relacionar os compósitos com adição de fibras ao traço que não possui esse tipo de reforço, observa-se um comportamento significativamente mais eficiente nos concretos reforçados. No traço sem fibras, o corpo de prova rompe-se completamente logo após atingir a carga máxima, apresentando uma baixa abertura de fissura e ausência de resistência residual, o que evidencia a importância das fibras na redistribuição de tensões e na melhoria da tenacidade pós-fissuração do material.

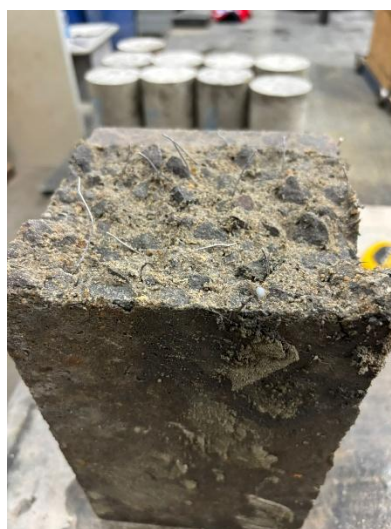
A ductilidade dos compósitos cimentícios representa a capacidade do material em suportar deformações significativas após a fissuração, mantendo parte da resistência e retardando o colapso total. Essa propriedade está diretamente associada ao tipo e à quantidade de fibras incorporadas, que atuam na ponte de fissuras e na redistribuição das tensões de tração na matriz. Para ilustrar o comportamento dos diferentes traços avaliados, consideramos a Figura 3, já apresentada e as Figuras 30, 31 e 32 abordando uma sequência comparativa dos corpos de prova após o ensaio de flexão, o traço sem fibras, o traço CR A0,6/C0,2, CR P0,6/C0,2 e CR P0,4/C0,4. A análise conjunta dessas imagens permite observar, de forma qualitativa, a influência do tipo e da proporção de fibras na ductilidade e integridade pós-fissuração.

Figura 30 – Rompimento parcial CR A0,6/C0,2



Fonte: Autor (2025)

Figura 31 – Arrancamento de fibras CR P0,6/C0,2



Fonte: Autor (2025)

Figura 32 – Arrancamento das fibras CR P0,4/C0,4



Fonte: Autor (2025)

A análise das figuras permite observar diferenças marcantes no comportamento pós-fissuração e na ductilidade dos compósitos avaliados. Na figura do referencial, correspondente ao traço de referência sem fibras, verifica-se o colapso total da estrutura, com fissuração abrupta e rompimento frágil, incapaz de manter resistência após a ruptura. Já na segunda figura mencionada, referente ao traço com fibras de aço (A0,6/C0,2), nota-se que não ocorre o comprometimento completo do corpo de prova, sendo possível identificar aberturas de fissuras associadas ao alongamento e, posteriormente, à ruptura das fibras, o que resulta em um comportamento altamente dúctil, com propagação de fissuras de forma gradual e controlada.

Na terceira figura, correspondente ao traço com fibras de polipropileno (P0,6/C0,2), a abertura de fissuras ocorre predominantemente por arrancamento das fibras, o que ocasiona uma ruptura um pouco mais abrupta, porém ainda com avanço lento e previsível, conferindo ao material uma ductilidade moderada, inferior à do concreto reforçado com aço, mas superior à do traço de referência. Por fim, na quarta figura, representando o traço CR P0,4/C0,4, com menor teor de macrofibras, observa-se que, ao atingir aberturas em torno de 6 mm, o colapso total do elemento se torna evidente. Também associado ao arrancamento das fibras, esse traço apresenta o menor desempenho em ductilidade entre os compósitos reforçados, embora ainda superior ao concreto sem fibras, reforçando a eficiência e a relevância do uso de fibras como reforço em compósitos cimentícios.

De forma semelhante, o comportamento observado neste estudo no ensaio de flexão em três pontos com leitura de CMOD mostra clara compatibilidade com os resultados apresentados por Birol e Avcialp (2025). No trabalho dos autores, a adição de fibras proporcionou recuperação de carga após a fissuração, aumento expressivo da resistência residual e uma transição nítida de um comportamento frágil para um comportamento dúctil, considerando teores de fibra próximos aos empregados nesta pesquisa. Essa tendência reforça os resultados obtidos aqui, nos quais a combinação de macro e microfibras, com destaque para a fibra de carbono, também promoveu maior capacidade pós-fissuração, incremento da ductilidade e estabilização da abertura da fissura, como evidenciado nos gráficos. Embora o estudo de Birol e Avcialp utilize exclusivamente fibras de polipropileno, o padrão de resposta observado confirma que o emprego de reforço fibroso, contribui de forma consistente para o

aumento da resistência residual e da tenacidade, corroborando a interpretação dos resultados deste trabalho.

5. CONCLUSÕES

Ao longo deste estudo, investigou-se a viabilidade técnica do concreto com fibras híbridas (combinações de macrofibras e microfibras) como alternativa ao aço na construção civil, com foco em aplicações típicas, exemplo dos pisos industriais apoiados diretamente sobre o solo, onde as fibras se mostram mais eficientes.

Quanto à trabalhabilidade, confirmou-se que a incorporação de fibras reduz a fluidez do concreto fresco, efeito mais pronunciado com teores mais elevados da fibra de carbono. O uso de aditivo superplastificante foi determinante para alcançar o abatimento estipulado sem alterar a relação a/c, permitindo a adequada moldagem e adensamento dos corpos de prova. Observou-se, também, que a maior presença de microfibras mitigou manifestações no estado plástico, como a exsudação, aparente nos traços com maior teor de macrofibras, e microfissuração superficial, o que é coerente com a expectativa de menor conectividade de poros capilares superficiais.

Considerando que as fibras contribuem para reduzir a absorção de água no concreto, elevando sua durabilidade, o traço CR P0,6/C0,2 apresentou o melhor desempenho. Esse resultado está diretamente relacionado à presença da fibra de polipropileno, material caracterizado por sua baixa absorção de água e alta resistência química, que atua como um elemento hidrofóbico, dificultando a penetração de líquidos na matriz cimentícia. Na prática, esse comportamento favorece a durabilidade em serviço, especialmente em ambientes sujeitos à abrasão moderada e ao ataque de agentes agressivos, comuns em ambientes da construção civil.

No desempenho mecânico, as misturas com fibras híbridas apresentaram redução na resistência à compressão, algo esperado analisando o comportamento do compósito. Quanto menor a proporção da massa cimentícia na mistura, menor será sua resistência à compressão. Já para a resistência a flexão, observa-se ganhos expressivos no comportamento pós-fissuração, refletidos em maior capacidade de carga residual com patamares mais estáveis após o pico. Em termos comparativos, a macrofibra (aço ou PP) respondeu pela contribuição predominante ao reforço pós-fissuração em aberturas maiores, enquanto as microfibras de carbono atuaram de forma mais sensível nas primeiras aberturas, retardando a coalescência de fissuras. Tais resultados confirmam o efeito sinérgico buscado na hibridização, com melhora perceptível do compósito frente à flexão. Assim, levando em consideração as misturas

realizadas, em ambos os testes de resistência, o traço CR P0,4/C0,4 absorve melhor as cargas.

Ao analisar o controle de fissuração e o comportamento pós-fissuração, observou-se que o traço CR A0,6/C0,2 apresentou o melhor desempenho, exigindo maior tempo sob carga para o avanço das fissuras. Nos traços com fibras de polipropileno, verificou-se que as macrofibras foram predominantemente arrancadas do compósito, acelerando a abertura das fissuras; já nas misturas com fibras de aço, essas permaneceram ancoradas até o rompimento, evidenciando sua eficácia no reforço pós-fissuração.

A combinação sinérgica entre as macrofibras de aço e polipropileno com as microfibras de carbono resultou em um comportamento mais estável e controlado após a fissuração, com maior capacidade de absorção de energia e deformação antes do colapso. Essa resposta confere ao concreto híbrido uma ductilidade superior e um rompimento mais gradual, em contraste com o colapso brusco característico do concreto convencional. Dessa forma, o material demonstra elevado potencial para substituir parcial ou totalmente as malhas metálicas de distribuição em pisos industriais, desde que respeitados os critérios de dimensionamento e desempenho previstos nas normas técnicas vigentes.

Corroborando a análise dos resultados, os ensaios realizados foram determinantes para a caracterização do compósito e para a compreensão de suas propriedades mecânicas. Observou-se que os traços sem a adição de fibra de aço apresentaram desempenho superior quanto à absorção de água, fator diretamente relacionado à durabilidade do material e de especial relevância quando se considera a suscetibilidade à corrosão das armaduras metálicas em ambientes agressivos. Esses traços também demonstraram resultados mais expressivos de resistência à compressão e resistência inicial à flexão, características essenciais para o uso do concreto em aplicações estruturais. Por outro lado, em termos de trabalhabilidade (abatimento), resistência pós-fissuração e ductilidade, embora o traço CR A0,6/C0,2 tenha apresentado comportamento mais satisfatório, os demais compósitos híbridos apresentaram valores próximos, indicando que a macrofibra de polipropileno pode atuar como um substituto técnico viável ao aço, com vantagens adicionais ligadas à leveza, facilidade de mistura e ausência de corrosão.

De modo geral, as misturas ensaiadas atenderam aos objetivos de avaliação propostos, comprovando que a hibridização de fibras, mesmo sem utilizarmos o aço, é uma solução tecnicamente viável e eficiente para o reforço de concretos em aplicações de alto desempenho, proporcionando melhorias na característica do material. Além disso, o uso combinado de fibras reduz a suscetibilidade a processos corrosivos e contribui para maior durabilidade e sustentabilidade das estruturas.

Por fim, reconhecem-se as limitações deste trabalho: i) avaliação experimental restrita às idades até 35 dias; ii) número finito de combinações e teores de fibras; iii) ausência de ensaios funcionais de fadiga, impacto e retração de longa duração; iv) inexistência de provas em escala real (placas de piso) e de análises de custo de ciclo de vida. Recomenda-se, portanto, como trabalhos futuros: (1) ampliar o estudo de durabilidade (carbonatação, cloretos, ciclos térmicos/úmidos-secos); (2) investigar fadiga/fissuração por retração e impacto/abrasão; (4) comparar, tecnicamente e economicamente, malha de aço x CRF híbrido em cenários de projeto reais, consolidando guias práticos de dosagem e dimensionamento.

REFERÊNCIAS

- A.M. Brandt (2008). **Fibre Reinforced Cement-Based (FRC) Composites After Over 40 Years of Development in Building and Civil Engineering**. *Composite Structures*, volume 86, páginas 3–9.
- ABREU, Felipe de Souza. **Concreto reforçado com fibras de carbono submetido a ataque por ácido clorídrico**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.
- AFROUGHSAKET, V. **Mechanical and durability properties of fiber reinforced concrete**. *Construction and Building Material*. v. 94, p. 73–82, 2015.
- ALBERTIM, A. M. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas entre compósitos reforçados com fibras de vidro e aço**; ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2016, Maringá.
- ALMEIDA, R. L. J. DE et al. **Assessing the bearing capacity of Crestbond shear connectors to concrete pry-out**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 16, n. 1, p. 1–19, 2023.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (ACI 440R-96)*. ACI Committee 440. Farmington Hills, USA, 2002.
- ANACLETO, J. C. **Uso de fibras de aço como alternativa para melhorar o desempenho do concreto quanto à resistência à tração na flexão**. 2014.
- ARQUEZ, A. A. **Aplicação de Laminado de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) inserido em Substrato de Microconcreto com Fibras de Aço para Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado**. 2010. 242 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. *The science and engineering of materials*. 4. ed. Boston: Cengage Learning, 2003.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. *UNE-EN 14889-2: Fibras para hormigón Parte 2: Fibras poliméricas Definiciones, especificaciones y conformidad*. Madrid, 2008. 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13755:2018: Revestimento de paredes internas e externas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante — Procedimento. Rio de Janeiro, 2018..

_____. ABNT NBR 16938: Concreto reforçado com fibras – Controle da qualidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. NBR 16940: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021. 11p.

_____. ABNT NBR 16938: Concreto reforçado com fibras – Controle da qualidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. NBR 5739; Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018, 9p.

_____. NBR 16889:2020: Concreto reforçado com fibras — Determinação da resistência residual à tração na flexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

_____. NBR 15823-2:2010: Concreto reforçado com fibras — Parte 2: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento. Rio de Janeiro, 2021. 27p.

NBR 15530 (fibras de aço),

_____. NBR 15530: Fibras de aço para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2007a. 7p.

_____. NBR 16942: Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021. 20p.

BELGO BEKAERT ARAMES. Fibras de aço Dramix®: soluções para concreto reforçado com fibras. 2013. Catálogo técnico.

BENTUR, A., MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**: New York, NY, USA, Taylor e Francis, 2007.

_____. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Elsevier Applied Science, London and New York, 1990.

BINA, P., CASTRO, P. R., TEIXEIRA, A.O.F. **Estado da arte dos pisos industriais e pavimentos: do sistema de damas ao protendido**. REIBRAC, Belo Horizonte, MG 2002.

BINA, P.: TEIXEIRA, A. O. F. – **Como Construir Pisos e Pavimentos Protendidos** – Revista Técnica – Edição nº 55 – São Paulo – 2001.

BIROL, Tamer; AVCIALP, Alper. Impact of Macro-Polypropylene Fiber on the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete. **Polymers**, [S. l.], v. 17, n. 9, p. 1232, 2025.

CARVALHO, Marcos Dutra de. **Pisos industriais de concreto**. São Paulo: ABCP, 2009.

CHODOUNSKY, M. A., VIECILI, F. A. **Pisos industriais de concreto: aspectos teóricos e construtivos**. São Paulo: Reggenza, 2007.

COX, H. L. **The elasticity and strength of paper and other fibrous materials**. British Journal of Applied Physics, v. 3, n. 3, p. 72–79, 1952.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN. Princípios, dosagem e aplicações do Engineered Cementitious Composites (ECC), 2023.

EN 14651:2005 + A1:2007 – Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Brussels: CEN, 2007. 14 p.

FERNANDES, Robson da Silva. **Concreto reforçado com fibras de bambu**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com fibras**. 1997. 342 f. Tese – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

_____. TORNERI, P. **Efeitos da Ancoragem em Ganchos de Fibras na Tenacidade dos Concretos**; VI SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO 1999, abril, São Paulo, SP. 1999.

_____. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. Boletim Técnico PCC/260.

_____. ABOU MOURAD, A.; CARVALHO, J. L. C. **Aspectos do Controle do Concreto Reforçado com Fibras de Aço para Pavimentos**; CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42., 2000, Fortaleza, CE.

_____. NUNES, N. L.; TANESI, J., **Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete**; Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon. Fibre Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB'2000, 2000. p. 103-118, 2000.

_____. ANTEGUERA, A. F.; de CEAA. A., SALVADOR R. P.; ESCARIZ R. C.; **Fibras Plásticas como Reforço de Tubos de Concreto**. Parte 1. Caracterização Tecnológica; 54 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2012, Maceió, AL.

_____. **Concreto Reforçado com fibras**. 2011. 247 f. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

_____. **Concreto com fibras**; ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011b. p. 1326-1365. v. 2.

FRANÇA, L. H. P. **Caracterização e modelagem numérica do comportamento não linear do concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras metálicas**. 2021. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

FUGIYAMA, R. T. **Concreto reforçado com fibras: estudo das propriedades mecânicas**. *Revista de Engenharia Civil*, v. 12, n. 3, p. 45–52, 2021.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Model Code 2010: Final draft. Lausanne: fib, 2013.

FÉLIX, A. H. O. **Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltriétoxisilano como agente de adesão**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; SILVA JUNIOR, W. L. A.; PIERI, T. S. **Variabilidade do Ensaio de Flexão em Vigas de Concreto Reforçado com Fibras de Aço**. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves, RS; IBRACON, 2007.

GUIMARÃES, Diego. **Avaliação das propriedades de concretos reforçados com fibras de aço para pisos industriais**. 2015. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GUO, H. **Influence of a hybrid combination of steel and polypropylene fibers on concrete toughness**. Study on mechanical properties of fiber reinforced concrete. *Materials Science Forum*, v. 980, p. 120–125, 2020.

KÖKSAL, F. **Durability properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibers**. Effect of steel fiber on mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 29, p. 82–88, 2012.

GÓIS, Fernanda Alves Pinto; BARBOZA, Aline da Silva Ramos. **Avaliação da influência da adição de fibras de aço no concreto fluido solicitado por tensões de tração**. *Scientia Plena*, Aracaju, v. 11, n. 11, 2015.

HANNANT, D. J.. **Fibre Cements and Fibre Concretes**. Toronto: John Wiley & Sons, 1978.

HANNANT, D. J. **Fibre reinforced cement and concrete**. London: CRC Press, 2003.

INNOCENTINI, M. D. M. **Efeito de fibras poliméricas na permeabilidade de concretos refratários**. 2001.

KRISHNA, A. **Strength and bond characteristics of hybrid fibre reinforced concrete subjected to elevated temperature**. *Journal of Structural Engineering*, v. 15, n. 2, p. 30–37, 2021.

LAWLER, J. S., WILHELM, T., ZAMPINI, D., SHAH, S. P, **Fracture process of hybrid fiber-reinforced mortar**. *Materials and Structures*, v. 36, p. 197-208, 2003.

LE, Z.; XIAOCHU, W.; YUANQING, W.; HONGTAO, L.; JUNWEI, W. **Experimental study of mechanical behaviors of carbon fiber reinforced concrete columns**. *AISS*, v. 5, n. 8, p. 27–35, 2013.

LEITE, A. M.; Castro, A. L. **Influência da adição de macrofibra polimérica no comportamento mecânico de concretos de alta resistência**. HAC2018: V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais, Valência, 2018.

LI, J. et al. **Flexural toughness and evaluation method of steel fiber reinforced self compacting lightweight aggregate concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 277, p. 122297, 2021.

- LI, V. C.; et al. **Engineered cementitious composites: tailored composites for structural applications**. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 20, n. 1, p. 1–15, 2022.
- MANFRO, Luana Marini. **Efeito do tratamento de microfibras de sisal nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras direcionadas**. 2024. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2024.
- MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.
- MEHTA, K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4^a ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.
- MORLEY, C. T. **Steel fiber reinforced concrete**. *Concrete International*, v. 4, n. 1, p. 55–60, 1972.
- NAAMAN, A. E. **Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead**. Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB' 2000, 2000.
- NARAGANTI, S. R. **Experimental study on fiber reinforced concrete**. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. v. 11, n. 3, p. 45–52, 2020.
- PESCAROLO, A. A. **Avaliação de vigas de concreto armado com adição de fibras de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.
- PESTANA, J. M. **Concreto com fibras: análise do comportamento mecânico**. *Revista Construção Civil*, v. 9, n. 2, p. 30–37, 2017.
- QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.
- RODRIGUES, L. A.; MONTARDO, J. P. **Influência da incorporação de fibras em compósitos cimentícios**; Congresso Brasileiro do Concreto, 44., 2002, Fortaleza.
- SCHIAVON, A. **Concreto com fibras: uma revisão sobre o uso de fibras no concreto**. *Revista Técnico Científica*, v. 5, n. 2, p. 25–32, 2007.
- SHAH, S. P.; SKARENDAHL, A. **Steel fiber reinforced concrete: current design and practice**. *Structural Journal*, v. 82, n. 1, p. 1–16, 1985.

- SILVA, F. A.; MOBASHER, B. **Modeling and characterization of fiber reinforced concrete behavior.** *Construction and Building Materials*, v. 230, p. 117048, 2020.
- SOUSA, A. R.; ALBERTIM, A. M. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas entre compósitos reforçados com fibras de vidro e aço.**; ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2016, Maringá.
- TANESI, J.; AGOPYAN, V. **Compósitos reforçados com fibras plásticas para a construção civil**; ENCONTRO TECNOLOGIA DE SISTEMAS PLÁSTICOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1997, São Paulo.
- THE CONCRETE SOCIETY. Technical Report 63: Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete. Camberley: The Concrete Society, 2007.
- UNE-EN 14889-2:2008. Fibras para hormigón – Parte 2: Fibras poliméricas – Definiciones, especificaciones y conformidad. Madrid: AENOR, 2008.
- VANDEWALLE, L.; BARR, B.; BARROS, J. A. O.; CHOI, Y. C.; FIBER, J.; FONTAINE, L.; GETTU, R.; KHAYAT, K. H.; LÖFGREN, I.; PEONIS, N.; SOROUSHIAN, P.; TOUTLEMONDE, F.
- RAMALINGAM, V.; SHAINSHA, J.; HARSHITHA, M.; RAMADOSS, O. **Study on the mechanical property, water absorption, and acid resistance of steel and polypropylene hybrid fiber-reinforced recycled aggregate concrete.** *Building Materials and Structures*, v. 67, art. 2400004R, 2024.
- Recommendations of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – σ - ϵ design method.** *Materials and Structures*, Paris: RILEM, v. 36, n. 260, p. 560-567, 2003.
- RIBEIRO, Arthur Francisco Claro. **Estudo experimental de concretos híbridos reforçados com fibra vidro e polipropileno armados com GFRP**, 2024.
- XIONG, S. H.; XIA, D. T.; LIU, X. K. **Flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete under notched beam three-point bending.** *Advanced Materials Research*, v. 906, p. 311-317, 2014
- ZHANG, Y.; et al. **Performance of fiber-reinforced concrete under various loading conditions.** *Construction and Building Materials*, v. 250, p. 118–126, 2024.

APÊNDICES**Apêndice A**

Apêndice A – Valores de granulometria da areia

Abertura (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada Média
4,75	0,00	0
2,36	3,43	3
1,18	11,55	15
0,60	29,57	45
0,30	41,96	87
0,15	12,33	99
Fundo	1,16	100
Total	100	349
Diâmetro Máximo		2,36 mm
Módulo de Finura		2,49

Fonte: Autor (2025)

Apêndice B

Apêndice B – Valores de granulometria da brita

Abertura (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada Média
37,5	-	-
25	-	-
19	2,52	3
12,5	44,17	46
9,5	34,87	81
6,3	17,05	98
4,75	0,50	99
Fundo	0,89	100
Total	100	427
Diâmetro Máximo		19 mm
Módulo de Finura		6,30

Fonte: Autor (2025)

Apêndice C

Apêndice C – Valores de abatimento

Traço	Teor Aditivo (%)	Slump S/F (cm)	Slump C/F (cm)	Teor adicionado de aditivo (%)	Slump final (cm)	Teor final (%)
CR A0,6/C0,2	0,62	23	6	0,44	14	1,06
CR P0,6/C0,2	0,62	24	4,5	0,57	15	1,19
CR P0,4/C0,4	0,83	28,5	1	2,99	16	3,81

Fonte: Autor (2025)

Apêndice D

Apêndice D – Absorção de água por traço

Traço	Corpo de prova	Resultado (%)	Desvio Padrão (%)
CR A0,6/C0,2	1	7,79	0,59
	2	7,25	
	3	6,61	
CR P0,6/C0,2	1	6,61	0,17
	2	6,95	
	3	6,79	
CR P0,4/C0,4	1	7,15	0,02
	2	7,11	
	3	7,10	

Fonte: Autor (2025)

Apêndice E

Apêndice E – Valores de resistência a compressão

Traço	Idade	Corpo de prova	Resultado (MPa)	Desvio Padrão (%)	
CR A0,6/C0,2	7	1	10,09	0,77	
	7	2	9,62		
	7	3	8,58		
	CR A0,6/C0,2	28	1	13,74	2,08
		28	2	10,44	
		28	3	9,90	
		35	1	9,75	
		35	2	10,25	
		35	3	12,23	
CR P0,6/C0,2	7	1	9,75	0,54	
	7	2	9,58		
	7	3	10,59		
	CR P0,6/C0,2	28	1	11,53	1,56
		28	2	14,01	
		28	3	11,13	
		35	1	12,64	
		35	2	10,91	
		35	3	12,08	
CR P0,4/C0,4	7	1	11,89	0,67	
	7	2	10,58		
	7	3	11,49		
	CR P0,4/C0,4	28	1	12,13	0,45
		28	2	12,07	
		28	3	12,88	
		35	1	13,03	
		35	2	12,45	
		35	3	12,53	

Fonte: Autor (2025)

Apêndice F

Apêndice F – Resistência à tração na flexão pela prensa

Traço	Idade	Corpo de prova	Resultado (MPa)	Desvio Padrão (%)
CR A0,6/C0,2	28	1	2,15	0,16
	28	2	2,38	
CR P0,6/C0,2	28	1	2,53	0,13
	28	2	2,34	
CR P0,4/C0,4	28	1	2,66	0,40
	28	2	2,09	

Fonte: Autor (2025)